



Influence d'une lésion occipitale sur le traitement de l'information visuelle. Approche comportementale et fonctionnelle (IRMf) de la réorganisation corticale

Céline Perez

► To cite this version:

Céline Perez. Influence d'une lésion occipitale sur le traitement de l'information visuelle. Approche comportementale et fonctionnelle (IRMf) de la réorganisation corticale. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENS039 . tel-00825372

HAL Id: tel-00825372

<https://theses.hal.science/tel-00825372>

Submitted on 23 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : PCN - Sciences Cognitives, Psychologie et
Neurocognition

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Céline PEREZ

Thèse dirigée par **Sylvie CHOKRON**

Préparée au sein du **Laboratoire de Psychologie et
Neurocognition** dans l'**École Doctorale Ingénierie de la Santé, de la
Cognition et Environnement, Grenoble** et de l'**Unité de Recherche
Vision et Cognition, Fondation A. de Rothschild, Paris**

Influence d'une lésion occipitale sur le traitement de l'information visuelle Approche comportementale et fonctionnelle (IRMf) de la réorganisation corticale

Thèse soutenue publiquement le **7 Décembre 2012**
devant le jury composé de :

Pr Isabelle BONAN, PU-PH, Rennes, (Rapporteur)

Dr Sylvie CHOKRON, DR, CNRS, Paris, (Directrice de recherche)

Pr Karine DORE MAZARS, PR, Paris, (Membre)

Pr Christian MARENDAZ, PR, CNRS, Grenoble, (Président)

Pr Ayman TOURBAH, PU-PH, Reims, (Rapporteur)



Remerciements

Mes premiers remerciements sont adressés à Sylvie Chokron, ma directrice de thèse. Je la remercie pour m'avoir proposé ce sujet et pour avoir dirigé cette thèse ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée. Je la remercie pour m'avoir encouragée et accompagnée depuis mes débuts dans la recherche en Master.

Je remercie vivement Carole Peyrin, du LPNC de Grenoble pour son aide qu'elle m'a offert, sa disponibilité (7/7) et son efficacité incroyable, ainsi que Cédric Pichat, et Emilie Cousin qui malgré la distance qui nous sépare ont toujours répondu à toutes mes questions et ont pu résoudre mes problèmes notamment pour la construction des batch, pour les analyses des données IRMf et les problèmes de synchronisation de E-Prime. Merci à Nathalie Guyader pour son aide concernant le filtrage des scènes.

Un grand merci à Céline Cavézian, pour toutes ses relectures concernant les articles et toutes ses corrections, et ses réponses à toutes mes questions concernant les statistiques... et il y en a eu !

Merci à Seta, pour ses conseils, son soutien et pour ses corrections. Merci à Florent et à Olivier Coubard.

Merci à Anny MANGEL, secrétaire de l'équipe, pour m'avoir rappelé les « *deadlines* ».

Mes sincères remerciements sont adressés à tous ceux qui ont participé à mes expériences ainsi que les patients qui m'ont aidé à avancer, à remettre en cause mon travail et à penser humainement tout simplement.

Je remercie Caroline Zala secrétaire de l'EDISCE et Claire Leroy secrétaire du LPNC de m'avoir facilité toutes les étapes administratives.

Merci à Tony mi primo ! Qui l'aurait cru ! Se retrouver à 30 ans au 48 avenue Mathurin Moreau côte à côte sans vraiment savoir qui on était l'un pour l'autre, alors que les Tías savaient, avant nous, qu'on allait travailler ensemble. Je dois dire que de te voir toute la journée lancer matlab et SPM à mes côtés m'a encouragé à continuer à le faire... j'espère que tu ne pleureras pas en lisant ces quelques lignes...

A toute la Fondation Rothschild et en particulier : au service d'imagerie pour leur accueil chaleureux, je m'y suis sentie un peu comme chez moi, je tiens à remercier en

particulier : Johana, Fabienne, Haili, Julien Savatovsky, Patricia Koskas, Malika Boucena, François Lafitte, Jean-Daniel Piekarsky, Françoise Héran.

Au service de neurologie, un grand merci aux secrétaires, à Michael Obadia et à Olivier Gout.

Merci à Marc, ACV, Vivien (El Chico), Isa pour leur soutien, pour leurs idées foisonnantes et leur enthousiasme perpétuel qui a été un moteur pour moi tout au long de ces années, ce fut un vrai marathon Votre présence a rendu ma vie au labo des plus agréables.

Enfin je dédie cette thèse à mes parents et à mon frère, qui ont eu la patience de m'épauler jusqu'au bout et qui ont cru en moi.

Merci à Marion. Tout simplement merci d'être MA MAMU.

Merci à Michèle et Marc d'avoir été dans les starting blocs pour la correction des fautes d'orthographe (300 pages en une demi-journée...)... dissimulées dans des phrases interminables et des tournures incompréhensibles....

A tous ceux qui sont passés au 48.

A Hugo qui m'a toujours encouragé même si au fond de lui il détestait le projet que je réalise ma thèse à plus de 600 km.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers les membres du jury qui ont bien voulu consacrer à ma thèse une partie de leur temps extrêmement précieux. Je remercie Pr Isabelle BONAN, Pr Karine DORE MAZARS, Pr Christian MARENDAZ, Pr Ayman TOURBAH.

Et bien sur, je remercie infiniment Fab, mon mari, qui pensait me faire oublier ma thèse ... Merci pour ton impatience, ta distance sur les choses, ton côté terre-à-terre sans nuance qui m'a permis de ne pas oublier l'essentiel et tout ton amour qui m'ont permis de terminer ce long projet.

Résumé

La répercussion d'un trouble visuel sur le traitement de scènes naturelles a été abordée selon trois approches : 1) une approche comportementale dans le but d'étudier la perception visuelle en champ central et en champs latéralisés, chez les participants sains et chez les patients hémianopsiques à la suite d'une lésion occipitale unilatérale ; 2) une approche fonctionnelle à l'aide d'une étude en IRMf afin d'évaluer tout d'abord l'incidence de la demande cognitive sur une tâche visuelle, chez les participants sains et chez les patients hémianopsiques, en champ central, puis d'observer l'impact d'une lésion occipitale droite et gauche sur la réorganisation corticale ; 3) enfin, une approche neuropsychologique dans le but d'étudier l'effet d'un entraînement visuel dans le champ aveugle des patients HLH, en utilisant les capacités visuelles inconscientes. Nous avons observé un impact différent sur le traitement visuel en champ central selon la latéralisation de la lésion occipitale (droite ou gauche). L'analyse visuelle est plus perturbée à la suite d'une lésion occipitale droite. Les données acquises en IRMf ont permis également de constater une différence des patterns d'activation selon la latéralisation de la lésion occipitale. Enfin, nous avons observé que l'entraînement dans le champ visuel aveugle des patients HLH, en utilisant les capacités de perception implicite : *blindsight*, permet d'obtenir une amélioration du champ visuel de manière quantifiable.

Mots clés : scènes naturelles, fréquences spatiales, hémianopsie latérale homonyme, plasticité cérébrale

« On ne voit bien qu'avec le coeur, l'essentiel est invisible pour les yeux ».

Antoine de Saint-Exupéry

Table des matières

LISTE DES ABREVIATIONS.....	17
Introduction.....	19

PARTIE 1

Traitement visuel : de la détection à la reconnaissance.....	28
--	----

CHAPITRE 1 : TRAITEMENT VISUEL : SUBSTRATS ANATOMIQUES.....	29
---	----

I. le système visuel périphérique : de l'œil au chiasma optique.....	30
1. L'œil	30
2. Le nerf optique.....	31
3. Le chiasma optique.....	31
II. Le système visuel cérébral : du chiasma au cortex visuel primaire.....	32
1. Tractus optique ou bandelettes optiques.....	32
2. Corps genouillés latéraux	33
3. Après le CGL : deux voies visuelles.....	36
4. Radiations optiques de Gratiolet.....	36
5. Cortex visuel primaire.....	37
III. Cortex occipital : caractéristiques anatomiques et fonctionnelles.....	38
1. De V1 à V2.....	38
2. Le cortex visuel associatif ou cortex extra-strié de V2 à V6.....	42
3. La voie ventrale et la voie dorsale : deux voies visuelles pour deux types de traitement.....	45
3.1. La voie ventrale ou occipito-temporale, circuit du « quoi »	46

3.2. La voie dorsale ou occipito-pariétale, circuit du « où »	47
4. Le « LOC » cortex occipital latéral.....	49
<u>Résumé</u>	52

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT VISUEL : ASPECTS COGNITIFS.....54

I. Traitement Global/Local	54
1. Reconnaissance visuelle « ultra » rapide chez les normaux.....	54
2. Effet de la précédence globale dans le traitement de l'information.....	58
3. Un principe de traitement <i>Coarse-to-Fine</i>	59
II. Spécialisation hémisphérique pour le traitement visuel des scènes naturelles.....	62
1. Asymétrie hémisphérique pour le traitement des Fréquences Spatiales contenues dans une scène naturelle.....	62
1.1. Définition et mise en évidence	62
1.2. Mise en évidence à l'aide de données issues de la neuropsychologie et de la neuro-imagerie.....	66
1.3. Spécialisation hémisphérique dès les aires postérieures dans le traitement des Fréquences Spatiales.....	68
1.4. Effet du sexe et du vieillissement sur la spécialisation hémisphérique.....	73
1.4.1. Effet du sexe sur la spécialisation hémisphérique.....	73
1.4.2. Effet du vieillissement sur la spécialisation hémisphérique.....	75
<u>Résumé</u>	77

CHAPITRE 3 : L'HEMIANOPSIE LATÉRALE HOMONYME COMME MODELE PATHOLOGIQUE DU TRAITEMENT VISUEL.....78

I. L'hémianopsie latérale homonyme (HLH).....	78
1. Définition	78
2. Comment mettre en évidence une HLH.....	80

1.1. Périmétrie cinétique de Goldmann.....	80
1.2. Périmétrie statique automatisée de type Humphrey.....	81
2. Etiologie et corrélat anatomique de l'HLH.....	86
3. Signes associés	88
II. Le <i>blindsight</i>	92
1. Définition du <i>blindsight</i> : déficit absolu dans l'hémichamp visuel amputé ?.....	92
2. Caractéristiques du <i>blindsight</i>	95
3. Deux types de <i>blindsight</i>	96
4. Hypothèses explicatives / substrats neuronaux du <i>blindsight</i>	97
4.1. Hypothèse de l'épargne corticale.....	97
4.2. Hypothèse d'un réseau secondaire : réseau sous-cortical	98
4.3. Les limites de l'IRMf dans l'étude du <i>blindsight</i>	102
4.4. Dernière hypothèse explicative.....	103
4.5. Seule la voie dorsale impliquée dans le <i>blindsight</i> ?.....	111
4.6. Vers une localisation de la conscience	112
<u>Résumé</u>	113

PARTIE 2

Traitement des scènes visuelles : de l'approche comportementale à l'approche neuropsychologique.....	116
---	------------

CHAPITRE 1: APPROCHE EXPERIMENTALE : TRAITEMENT DES SCENES VISUELLES CHEZ DES PARTICIPANTS SAINS.....	117
--	------------

I. Etude 1 : Détection et catégorisation dans le champ visuel gauche, central et droit, chez des participants sains.....	117
1. Résumé des résultats obtenus chez les participants sains.....	118
2. Problématique et méthode.....	118
3. Partie expérimentale.....	120
3.1. Population.....	120
3.2. Stimuli	121
3.3. Procédure.....	122
3.3.1. Tâche de détection.....	123
3.3.2. Tâche de catégorisation.....	124
3.4. Plan expérimental et hypothèses opérationnelles.....	125
3.4.1. Plan expérimental.....	125
3.4.2. Objectifs théoriques, et hypothèses opérationnelles	126
a. Tâche de détection	128
b. Tâche de catégorisation	128
Article 1.....	130
4. Discussion et conclusion	141
<u>Résumé.....</u>	<u>149</u>

CHAPITRE 2 : APPROCHE NEUROPSYCHOLOGIQUE : TRAITEMENT DES SCENES VISUELLES CHEZ DES PATIENTS HEMIANOPSIQUES.....	150
--	-----

I. Etude 2 : L’HLH comme modèle pathologique du traitement visuel : effet d’une lésion occipitale gauche ou droite sur la reconnaissance de scènes naturelles en champ central.....	150
---	-----

1. Hypothèses générales	151
2. Méthode expérimentale	152
2.1. Participants	152
2.2. Matériel et procédure.....	152
2.2.1. Stimuli	152
2.2.2. Procédure	153
a. Déroulement d’un essai	153
b. Tâche	153
2.2.3. Plan d’expérience.....	154
2.2.4. Hypothèses opérationnelles.....	154

Article 2	156
------------------------	-----

3. Discussion.....	166
4. Conclusion	169

<u>Résumé</u>	170
---------------------	-----

II. Etude 3 : L’HLH comme modèle pathologique du traitement visuel : effet d’une lésion occipitale gauche ou droite sur la reconnaissance de scènes naturelles en champ gauche, droit et central.....	172
---	-----

1. Objectifs.....	172
2. Hypothèses générales.....	173
3. Méthode expérimentale.....	174
3.1. Participants.....	174
3.2. Matériel et procédure.....	176
3.2.1. Stimuli	176

3.2.2. Procédure (identique à celle de l'étude 1)	177
3.2.3. Tâches.....	177
a. Tâche de détection.....	177
b. Tâche de catégorisation.....	178
3.4. Plan d'expérience.....	179
3.5. Hypothèses opérationnelles.....	180
3.5.1. Tâche de détection	180
3.5.2. Tâche de catégorisation.....	180
3.5.3. Détection versus catégorisation.....	181
4. Résultats.....	182
4.1. Tâche de détection.....	182
4.2. Tâche de catégorisation.....	184
4.3. Tâche de catégorisation vs détection.....	190
4.4. Résumé Résultats.....	192
5. Discussion	193
5.1. Effet des Fréquences Spatiales.....	193
5.2. Effet du Type de scène.....	193
5.3. Champ visuel sain des patients HLH	193
5.4. Champ visuel aveugle des patients HLH.....	194
6. Conclusion.....	196
<u>Résumé</u>	196

PARTIE 3

Plasticité cérébrale, de la neuro-imagerie fonctionnelle à l'approche neuropsychologique.....198

CHAPITRE 1 : REORGANISATION CEREBRALE

APRES LESION DE L'ŒIL OU DU CERVEAU.....199

I. Plasticité cérébrale.....	199
1. Plasticité cérébrale : chez l'enfant et chez l'adulte sain sous influence de l'apprentissage.....	199
1.1. Périodes critiques.....	200
1.2. Effet de l'âge.....	201
2. Plasticité cérébrale : en cas de lésion.....	202
2.1. Plasticité cérébrale à la suite d'une lésion périphérique du système visuel...205	
2.1.1. Lésion de l'œil.....	205
2.1.2. Lésion du nerf optique ou du chiasma optique	211
2.2. Plasticité cérébrale à la suite d'une lésion centrale du système visuel.....	214
2.2.1. Dynamique de la réorganisation après une lésion cérébrale	214
2.2.2. La réorganisation corticale 'maladaptative' à la suite d'une lésion centrale.....	215

CHAPITRE 2 : PHENOMENES DE REORGANISATION CEREBRALE APRES UNE LESION OCCIPITALE DROITE OU GAUCHE.....218

I. Etude 4 préliminaire en IRMf : Plasticité des aires visuelles cérébrales : effets	
II. de la latéralisation de la lésion et de la consigne.....	218
1. Bref rappel.....	219
1.2. La réorganisation corticale dans la HLH.....	220

1.3. Traitement visuo-spatial, spécificité de la tâche, et asymétrie hémisphérique.....	221
2. Etude préliminaire.....	222
2.1. Méthode.....	222
2.1.1. Participants.....	222
2.1.2. Protocole expérimental.....	223
2.1.3. Procédure IRMf (Cf annexe 4).....	225
2.2. Traitement des images	226
3. Résultats.....	226
3.1. Le participant contrôle.....	226
3.2. Le patient HLH droit.....	229
3.3. Le patient HLH gauche.....	229
Article 3.....	232
4. Discussion.....	247
4.1. Etude en IRMf.....	247
4.1.1. Chez les sujets contrôles.....	247
4.1.2. Chez les patients HLH droit cérébro-lésés gauche	247
4.1.3. Chez les patients HLH gauche cérébro-lésés droit	248
4.2. Réorganisation corticale.....	248
4.3. Techniques de neuromodulation.....	249
<u>Résumé</u>	251

CHAPITRE 3 : PRISE EN CHARGE DES AMPUTATIONS DU CHAMP VISUEL D'ORIGINE CERVEBRALE.....252

I. Réhabilitation des amputations du CV d'origine centrale.....	252
1. HLH et Récupération spontanée.	252
2. Nécessité d'une prise en charge de l'HLH	253
3. Différentes techniques de rééducation pour l'HLH.....	255
3.1. Techniques de compensation.....	255

3.2. Techniques de restauration.....	258
3.2.1. Techniques de rééducation : oculomotrice	258
3.2.2. Technique de rééducation : utilisation du <i>blindsight</i>	261
4. Peut-on utiliser les capacités inconscientes des patients, comme support de rééducation en neuropsychologie ?.....	262
4.1. Peut-on restaurer la vision chez les patients HLH en utilisant les capacités de <i>blindsight</i> ?.....	263
4.2. Réorganisation corticale à la suite d'une lésion, dans le cas d'une récupération comportementale.....	265
4.3. Substrats neuronaux impliqués lors de la récupération.....	267
<u>Résumé</u>	268
Article 4	270
5. Discussion et Conclusion.....	287
5.1. Modification comportementale.....	288
5.2. Entraînement des capacités visuelles implicites.....	289
5.3. Rôle de l'attention dans l'amélioration du champ visuel	290
5.4. Conclusion.....	291
<u>Résumé</u>	292
Discussion générale et conclusions	294
1. Chez les participants sains.....	296
1.1. Spécialisation hémisphérique.....	296
1.2. Effet de la consigne.....	297
2. Chez les patients hémianopsiques.....	299
2.1. Spécialisation hémisphérique.....	299
2.2. Champ visuel sain des patients HLH.....	300
2.2.1. Effet d'une lésion occipitale droite (HLHg)	300
2.2.2. Effet d'une lésion occipitale gauche (HLHd).....	301
2.2.3. Impact de la latéralisation de la lésion.....	301
2.3. CV central des patients HLH.....	302

2.3.1. Effet de la consigne	303
2.3.2. Intégrité du champ central ?	303
2.3.3. Spécialisation hémisphérique et réorganisation corticale	305
2.3.4. Réorganisation corticale et latéralisation de la lésion	306
2.4. Champ visuel aveugle.....	308
2.4.1 <i>Blindsight</i> , effet de la latéralisation de la lésion ?.....	308
2.4.2 Effet de la consigne.....	309
2.4.3. Spécialisation hémisphérique.....	310
3. Prise en charge.....	310
4. Remise en question de la réorganisation.....	312
Conclusions et perspectives.....	314

Bibliographie.....	320
--------------------	-----

Annexes.....	350
Annexe 1 : Consignes étude 1 et 3.....	351
Annexe 2 : Consignes étude 2 et 4.....	352
Annexe 3 : Transformée de Fourier.....	353
Annexe 4 : IRMf.....	354
1. Principe de l'imagerie par résonance magnétique (IRM).....	354
2. L'IRM fonctionnelle.....	357
2.1. Quel phénomène neurophysiologique mesurons-nous durant la réalisation d'une tâche, en IRMf ?	360
3. Protocole expérimental.....	362
3.1. Acquisition des images	363
3.2. Paradigme.....	364
3.3. Traitement des images.....	365
3.4. Traitement des données.....	366
3.4.1. Les prétraitements	366
3.4.2. Analyses	370

Liste des abréviations

<p>σ écart-type</p> <p>AB Aire de Brodmann</p> <p>ANOVA ANalysis Of VAriance (analyse de variance)</p> <p>AVC Accident Vasculaire Cérébrale)</p> <p>BFS Basses Fréquences Spatiales</p> <p>BOLD Blood Oxygenation Level Dependent</p> <p>BS <i>Blindsight</i></p> <p>CA Commissure Antérieure</p> <p><i>cf.</i> confer</p> <p>CGL Corps Genouillé Latéral</p> <p>CVc Champ Visuel central</p> <p>CVd Champ Visuel droit</p> <p>CVg Champ Visuel gauche</p> <p>CP Commissure Postérieure</p> <p>DMLA Dégénérescence Maculaire Liée à l'Âge</p> <p>EEG Electroencéphalographie</p> <p>e.g. exempli gratia (par exemple)</p> <p>ER Erreur</p> <p>EPI Echo Planar Imaging</p> <p>FA Fausses Alarmes</p> <p>FoV Field of View</p> <p>GLM General Linear Model (modèle linéaire général)</p> <p>HD Hémisphère Droit</p> <p>HFS Hautes Fréquences Spatiales</p> <p>HG Hémisphère Gauche</p> <p>HLHd Hémianopsie Latérale Homonyme droite</p>	<p>HLHg Hémianopsie Latérale Homonyme gauche</p> <p>i.e. id est (c'est à dire)</p> <p>IRM Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire</p> <p>IRMf Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle</p> <p>LOC Complexe Occipital Latéral</p> <p>LOtv cortex Occipital Latéral de la vision</p> <p>LSD <i>Least Significant Difference</i></p> <p>M Magnocellulaire</p> <p>MAV Malformation Artério-Veineuse</p> <p>MNI Montreal Neurological Insitute</p> <p>mm millimètre</p> <p>ms milliseconde</p> <p>MT+/V5 aire visuelle associative (perception du mouvement)</p> <p>NF Non-Filtré</p> <p>OCT Tomographie Optique Cohérente</p> <p>P Parvocellulaire</p> <p>RMN Résonance Magnétique Nucléaire</p> <p>SPM Statistical Parametric Mapping</p> <p>T1 Temps de relaxation longitudinale</p> <p>T2(*) Temps de relaxation transversale</p> <p>TC Traumastime Crânien</p> <p>Te Temps d'écho</p> <p>TEP Tomographie par Emission de Positions</p> <p>TMS Stimulation Magnétique Transcranienne</p> <p>TR Temps de Réponse</p> <p>Tr Temps de répétition</p> <p>V1 Cortex visuel primaire</p> <p>vs. versus</p>
--	--

Introduction

Voir c'est accéder directement à la réalité, c'est prendre connaissance du monde extérieur, c'est avoir conscience de ce qui nous entoure. La conscience est une notion délicate et difficile à définir, en effet selon les époques et les disciplines, la définition est vacillante. En général ce qui en résulte c'est qu'il est terriblement troublant d'avoir conscience de sa conscience, probablement du fait du caractère impalpable et insaisissable de cette conscience, mais également du fait du caractère automatique de celle-ci. En effet nous voyons, nous avons conscience de notre environnement mais finalement sans en avoir constamment conscience. Pour ainsi dire, nous voyons comme nous respirons, ces deux processus ont pour lien commun leur automaticité et par conséquence directe une forme de conscience non consciente.

Du début de la philosophie à nos jours : époque des neurosciences, l'homme court après sa conscience, tient à l'attraper et surtout à la localiser. Elle est la relation entre « moi », ma perception et l'extérieur, c'est-à-dire l'autre et mon environnement. Le mot français « conscience » vient du latin *conscientia* qui est formé de *cum* qui signifie « avec », et de *scientia* pour « science ». C'est une « Connaissance, intuitive ou réflexive immédiate, que chacun a de son existence et de celle du monde extérieur » [Larousse]. Pour voir il faut être conscient du monde qui nous entoure, et être conscient de soi-même existant dans ce monde.

Kant : « La conscience de ma propre existence est en même temps une conscience immédiate d'autres choses hors de moi ».



La condition humaine. René Magritte, 1933.

La conscience s'appuie sur la perception. Selon *Werner Heisenberg* (physicien allemand) l'un des fondateurs de la mécanique quantique « L'observateur ne peut être séparé de ce qu'il observe. Sans observateur, pas de réalité à observer ». Cette citation évoque le lien qui unit la perception et la conscience. Ce lien qui permet à l'observateur de construire une représentation du monde extérieur, mais également du monde qu'il parvient à se construire à l'intérieur de lui-même et qui est probablement à la base de l'imagination ainsi que des représentations mentales. Effectivement il y a deux sens au terme « observer », tout d'abord celui-ci peut renvoyer à l'idée de la perception d'un objet en dehors de soi, et, il désigne également le sens d'un recueillement, d'une construction à l'intérieur de soi-même, de quelque chose de non présent. C'est-à-dire qu'il n'y a pas d'objet dans ce cas, mais uniquement la construction et la représentation de cet objet à l'intérieur de soi. L'observation est alors un processus qui lie de manière inséparable l'observateur et l'observé. Ce lien constitue une espèce de continuum d'expérience entre l'observateur et l'objet observé et vice versa. C'est en ce sens que la perception et la conscience maintiennent un lien à la fois solide, réciproque, et ambigu. « *Nous ouvrons les yeux et notre esprit s'emplit aussitôt des perceptions dont nous avons conscience* ». (Naccache, 2006). En effet à chaque fois que nous ouvrons les yeux ou que nous gardons les yeux ouverts, une quantité infinie d'informations visuelles remplit nos yeux. L'information visuelle perçue navigue de l'œil jusqu'au cerveau où elle est analysée principalement par le cortex occipital. Mais comment cette information prend-elle sens ?

La vision commence donc au niveau de l'œil, qui reçoit les informations. Mais c'est au niveau du cerveau que cette information va être interprétée (Ungerleider & Mishkin, 1982). Ceci peut aller dans le sens d'un vieux proverbe arabe selon lequel : *Les yeux sont inutiles à un cerveau aveugle*. C'est en étudiant des patients souffrant de lésions neurologiques que des médecins et des chercheurs ont localisé et placé par déduction cette région permettant l'analyse visuelle à l'arrière du cerveau, au niveau de la scissure calcarine. Ils se sont aperçus que les patients souffrant de petites lésions dans cette région devenaient aveugles, dans une petite zone du champ visuel. En étudiant ces amputations du champ visuel, des ophtalmologistes comme Gordon Holmes, en 1908, ont découvert que le monde visuel est représenté de manière très fidèle au niveau du cortex, on parle alors de rétinotopie.

De part cette organisation anatomo-fonctionnelle, les capacités visuelles peuvent être entravées par une lésion de l'œil mais également des voies et/ou des centres corticaux visuels. En raison de l'étendue du système visuel dans le cerveau, une lésion cérébrale va fréquemment entraîner un déficit visuel. Ainsi, de récentes études font état de présence d'hémianopsie latérale homonyme (HLH) dans trente pour cent des cas d'accidents vasculaires cérébraux (AVC) chez l'adulte (Zang et *al.*, 2006). Certaines données évoquent, que dans soixante pour cent des cas de lésion cérébrale un trouble neurovisuel peut apparaître quelle que soit la localisation de la lésion (voir Rowe et *al.*, 2009 pour discussion). L'hémianopsie latérale homonyme, c'est-à-dire l'amputation du champ visuel controlatéral à la lésion, est sans doute le déficit d'origine centrale le plus fréquent (Chokron, 1996). Les patients porteurs d'une hémianopsie isolée ne présentent pas d'anosognosie, de troubles de la mémoire ou de désorientation. Cependant, ce trouble se révèle très handicapant dans toutes les activités cognitives et motrices faisant intervenir la détection et/ou l'analyse visuelle (lecture, écriture, marche, conduite automobile, sport, ...). Il semble donc intéressant d'évaluer les conséquences d'une lésion cérébrale engendrant un trouble visuel à la fois au niveau des capacités visuelles considérées comme abolies, mais également sur celles considérées comme toujours intactes. Le but de notre recherche est d'étudier les répercussions d'une lésion au niveau du cortex visuel primaire (occipital) en fonction de sa latéralisation, chez des patients présentant une hémianopsie latérale homonyme gauche ou droite en utilisant une tâche de reconnaissance de scènes naturelles, en champ central et en champs latéralisés. Le résultat de ces études, nous amène à penser qu'il existe une spécialisation hémisphérique au niveau cortical dans le traitement de l'information visuelle et notamment lors du traitement des fréquences spatiales (Peyrin, Chauvin, Chokron et Marendaz, 2003). Plusieurs travaux (Thorpe et *al.*, 1996 ; Hérault et *al.*, 1997 ; Oliva et *al.*, 1997) mettent en évidence que l'homme et l'animal sont capables de reconnaître, de catégoriser de façon très efficace et surtout très rapide une scène complexe en n'utilisant que des caractéristiques de bas niveau constituant cette scène. Ces caractéristiques sont préférentiellement associées aux fréquences spatiales contenues dans la scène et il semble que seules les plus basses fréquences suffisent pour reconnaître une scène. Par ailleurs, plusieurs travaux ont montré que les fréquences spatiales permettent d'identifier les propriétés globales (le contour) des scènes naturelles (Oliva et *al.*, 2001).

Les travaux sur lesquels nous nous appuyons (Peyrin, Chauvin, Chokron et Marendaz, 2003) postulent que l'hémisphère droit traiterait préférentiellement les basses fréquences et l'hémisphère gauche les hautes fréquences spatiales. En manipulant le contenu fréquentiel des scènes naturelles nous pourrions alors évaluer les mécanismes déficitaires dans le traitement des basses et des hautes fréquences spatiales chez les patients hémianopsiques en fonction de la latéralisation de la lésion. Nous allons également étudier les capacités perceptives dans le champ visuel aveugle des patients hémianopsiques, afin d'explorer le lien entre la perception visuelle et la conscience. Nous avons évoqué jusqu'à maintenant le lien étroit qui unit la perception et la conscience, selon lequel nous ne pouvons pas percevoir sans conscience, cependant le traitement des informations visuelles dans le champ visuel aveugle des patients hémianopsiques nous amène à modérer ce propos.

Partie 1

Cette partie présente les substrats anatomiques, les aspects cognitifs et un modèle lésionnel du traitement visuel.

Le **premier chapitre** tente de faire un état des lieux des connaissances existantes à propos du traitement de l'information visuelle. De l'œil au cerveau une approche anatomique et fonctionnelle est proposée pour présenter l'organisation et le fonctionnement du système visuel. Après avoir décrit les voies visuelles et plus précisément le fonctionnement de la vision au niveau cortical, nous abordons les aspects cognitifs du traitement visuel. Le **second chapitre** présente le processus complexe qu'est la reconnaissance visuelle, démontrant à l'aide d'études récentes que ce processus complexe est néanmoins très rapide. Nous nous appuyons sur les thématiques suivantes : l'effet de la précedence globale dans le traitement de l'information visuelle, que nous rapprochons du traitement *coarse-to-fine* des fréquences spatiales constituant une scène naturelle visuelle, ainsi que la spécificité de ces traitements au niveau de chaque hémisphère [spécialisation hémisphérique]. Nous verrons ensuite que ce traitement cortical complexe peut être modulé selon le sexe et l'âge des participants. Même si ce traitement visuel est d'une grande complexité, nous verrons qu'il peut être localisé [études en IRM fonctionnelle à l'appui] dans des aires corticales dédiées à un traitement de bas niveau

tel que le cortex visuel primaire.

Ce dernier est généralement décrit comme consacré uniquement à la perception et à la représentation rétinotopique corticale, donc à un traitement visuel de bas niveau. Ceci dit de nombreuses études ont pu mettre en évidence dès cette aire, un traitement de haut niveau ainsi qu'une spécialisation de chaque hémisphère.

Le **troisième chapitre** présente l'hémianopsie latérale homonyme (HLH) comme un modèle pathologique du traitement visuel. Une définition détaillée de ce trouble visuel d'origine centrale est proposée. Nous exposons : tout d'abord les différents signes cliniques ainsi que les différentes causes étiologiques pouvant provoquer ce trouble. Ensuite les capacités préservées chez ces patients hémianopsiques malgré l'amputation du champ visuel. Nous définissons alors le concept de *blindsight* c'est-à-dire de perception inconsciente dans la partie du champ aveugle, à l'aide de diverses études comportementales les caractéristiques et les différents types de *blindsight*. Nous détaillons enfin les différentes hypothèses anatomo-fonctionnelles pour expliquer le phénomène de *blindsight*, à l'aide d'études menées avec différentes techniques d'imagerie. Nous décrivons enfin les substrats anatomiques de ce phénomène.

Partie 2

Cette partie présente le traitement visuel de scènes naturelles à la fois d'un point de vue expérimental et neuropsychologique.

Le **premier chapitre** aborde tout d'abord le traitement de scènes visuelles naturelles chez des participants contrôles. Nous appuyons nos arguments sur les résultats obtenus lors d'une tâche de Détection (de bas niveau) et de Catégorisation (de haut niveau) de scènes naturelles présentées en champ visuel gauche, central et droit, chez des participants témoins [article 1]. La tâche de détection et de catégorisation sont en réalité une seule et même tâche, qui ne diffèrent uniquement par la consigne. Ceci permet d'évaluer et d'isoler l'effet « *top-down* » de la demande de la tâche qui induit un traitement différent sur un même matériel. Puis dans le

second chapitre nous abordons les résultats obtenus chez les patients HLH. Ce chapitre s'articule en deux études, l'une visant à comprendre la manière dont les patients hémianopsiques traitent l'information dans leur CV central, sous forme d'article [article 2].

La seconde, a pour objectif d'étudier la manière dont les patients traitent l'information visuelle présentée en champs latéralisés. La première étude évalue, l'effet d'une lésion occipitale gauche ou droite sur le comportement de patients souffrant d'Hémianopsie Latérale Homonyme, lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles visuelles en champ central. La seconde étude permet de mesurer à la fois l'effet de la latéralisation d'une lésion occipitale sur le traitement des fréquences spatiales mais également la qualité du traitement des fréquences spatiales dans le champ visuel aveugle et sain (compte tenu de la présentation latéralisée des scènes) des patients HLH. En effet la mise en évidence d'une spécialisation hémisphérique dès les aires visuelles primaires, nous amène à nous interroger sur les répercussions d'une lésion au sein de ces aires. A la fois sur le traitement visuel de scènes naturelles, selon les niveaux de traitements demandés (induit par la consigne) : bas niveau, telle que la détection ou haut niveau tel que la catégorisation de scènes, ainsi que sur le traitement des fréquences spatiales. Le but de ces deux expériences est donc d'étudier à l'aide de scènes naturelles, le traitement des fréquences spatiales, chez des patients hémianopsiques, et ainsi d'évaluer l'incidence d'une lésion du cortex visuel primaire sur la spécialisation hémisphérique. On se demande si la latéralisation de la lésion occipitale (droite ou gauche) a une répercussion sur la nature du déficit lors du traitement des fréquences spatiales, et selon la consigne donnée (détection / catégorisation).

Partie 3

Cette partie présente la notion de plasticité cérébrale et de récupération comportementale.

Le **premier chapitre** présente le concept de la réorganisation corticale, avec tout d'abord une brève définition de la plasticité cérébrale. Nous abordons ce mécanisme de réorganisation corticale au cours du développement et chez l'adulte sain. Ceci nous amène à la notion de période critique et de l'effet de l'âge sur le mécanisme de plasticité cérébrale. Nous décrivons

la plasticité cérébrale dans le cadre de la pathologie engendrant soit une lésion périphérique soit une lésion d'origine centrale du système visuel. Nous détaillons sur quelle dynamique s'appuie cette réorganisation cérébrale.

Nous verrons également que cette réorganisation ne permet pas toujours de développer des capacités permettant de compenser un trouble, mais aboutit quelques fois à une « mal-réorganisation ». Nous étayons cette approche à l'aide de cas clinique décrits dans la littérature. Enfin, nous essayons d'expliquer comment ces capacités de plasticité cérébrale prennent forme, et quels sont les mécanismes qui la sous-tendent.

Le **chapitre deux** présente les apports de l'IRMf dans l'étude des phénomènes de réorganisation cérébrale à la suite d'une lésion, et notamment les répercussions d'une lésion occipitale lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles présentées en champ central. Cette étude menée en IRMf chez des patients HLH ainsi que chez des participants contrôles, sera présentée sous forme d'article [article 3].

Le **dernier chapitre** aborde les différents types de prise en charge des amputations du champ visuel d'origine centrale. Puis sous forme d'article [article 4] la question de la récupération de la vision dans le champ visuel aveugle des patients souffrant d'Hémianopsie Latérale Homonyme à la suite d'une lésion d'origine centrale. La question posée est la suivante : peut-on réduire le champ aveugle des patients HLH ? L'HLH est l'un des troubles visuels le plus courant à la suite d'une lésion occipitale unilatérale. Parfois on peut observer chez certains patients souffrant d'une lésion post-chiasmatique uni ou bilatérale, une récupération du champ visuel amputé de manière spontanée. Cependant cette récupération spontanée du champ est souvent très réduite (Pambakian et *al.*, 2005) et dépend de nombreux facteurs : tels que les troubles cognitifs associés, la pathologie sous-jacente responsable de l'amputation du champ visuel. Selon la plupart des auteurs, la récupération maximale apparaît dans les 10 jours qui suivent la lésion. A la suite de cette période de récupération spontanée (allant de 2 jours à 6 mois post-lésion selon les auteurs) l'amputation du champ visuel est considérée comme définitive, cependant des études récentes ont mis en exergue une récupération possible du champ visuel exploratoire de ces patients, c'est-à-dire une amélioration des capacités de recherche visuelle indiquant la mise en place de stratégies de compensation (Kerkhoff, 2000). En s'appuyant sur l'idée de ces dernières études ainsi que sur celles présentées : dans le

chapitre 3 de la première partie, sur les capacités visuelles inconscientes qui existent dans le champ visuel amputé et dans le chapitre 1 de cette partie sur les capacités de réorganisation cérébrale, nous présentons, les résultats obtenus chez des patients HLH à la suite d'un entraînement visuel intensif dans leur champ visuel contralésionnel.

Nous verrons que l'entraînement visuel dans le champ aveugle de ces patients permet d'améliorer leurs performances.

Pour terminer, nous présentons la discussion générale et la conclusion.

PARTIE 1

Traitement visuel : de la détection à la reconnaissance

CHAPITRE 1 : TRAITEMENT VISUEL : SUBSTRATS ANATOMIQUES.

Ce premier chapitre présente une revue succincte de la littérature sur les aspects anatomo-fonctionnels de la cognition visuelle chez l'animal et l'être humain de la rétine jusqu'au cerveau.

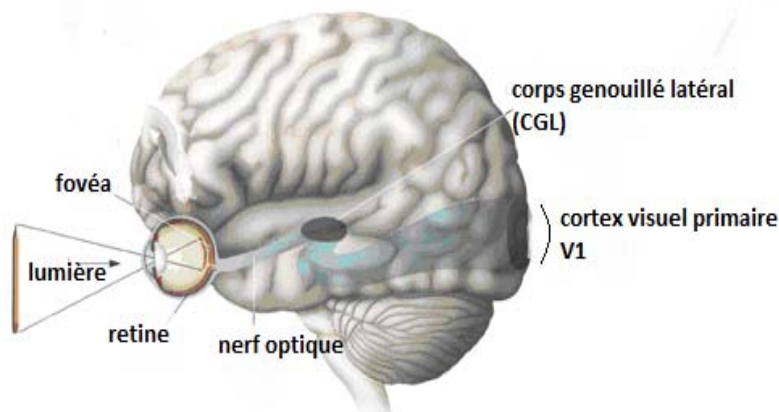


Figure 1 : Cheminement de l'information visuelle de l'œil jusqu'au cortex visuel primaire. (Figure tirée de <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doschim/imgArt/couleurs/popup15.htm>).

Les voies visuelles comprennent toutes les formations nerveuses qui transportent et traitent l'information visuelle depuis la rétine jusqu'au cerveau. Nous décrivons dans ce chapitre les différentes étapes du transfert de l'information visuelle de l'œil au cerveau (Figure 1).

Nous n'imaginons pas à quel point le simple fait de voir peut être un traitement infiniment complexe impliquant « des organes » eux aussi tout aussi complexes. Voir, regarder, reconnaître sont des processus sous-tendants des capacités cognitives qui impliquent que l'œil prenne l'information nécessaire dans son environnement et que le cerveau l'analyse ensuite.

Dès lors, nous abordons une notion de temporalité, de chronologie alors que dans notre vie quotidienne nous n'imaginons même pas, un seul instant, qu'il existe un délai temporel entre la prise d'information et le traitement de celle-ci. Ceci nous indique à quel point ce traitement est rapide et surtout automatique malgré sa complexité. Nous allons voir dans ce chapitre comment ce traitement visuel si complexe peut être effectué si rapidement. Une scène visuelle constituant notre environnement visuel quotidien est composée de nombreuses informations sur la taille, la couleur, la profondeur des éléments qui la constituent. C'est pourquoi, le système visuel humain semble avoir développé une technique très fine et perfectionnée pour traiter selon une certaine hiérarchie et selon certains critères particuliers tous ces stimuli qui nous entourent et nous parviennent par nos yeux à chaque instant.

I. le système visuel périphérique : de l'œil au chiasma optique

1. L'œil

Les informations visuelles plongent dans l'œil, sont captées par la rétine qui code l'image sous la forme d'impulsions électriques transmises au nerf optique (McCaa, 1982). Dès la rétine il existe une répartition inégale des photorécepteurs avec un rapport cônes sur bâtonnets diminuant du centre vers la périphérie.

L'information rétinienne est alors compressée jusqu'aux cellules ganglionnaires de celle-ci. Ces dernières sont des neurones singuliers avec toutefois une grande diversité déjà décrite morphologiquement par Ramon y Cajal. On reconnaît une diversité anatomo-fonctionnelle avec trois grandes classes de cellules ganglionnaires : les cellules ganglionnaires α , alpha, encore appelées en parasol, à la suite des travaux de Cajal et de Polyak (1941), car elles présentent un plus grand corps cellulaire et une arborisation plus étendue et diffuse. Elles sont de grande taille et ont des champs récepteurs étendus. Elles constituent près de 10% du total des cellules ganglionnaires de la rétine. Elles sont très sensibles aux faibles niveaux de contraste de luminance et aux variations rapides de contraste dans leur champ récepteur (vitesses rapides, papillotements). Elles sont à l'origine du trajet M, magnocellulaire, destiné aux couches les plus ventrales du corps genouillé latéral (CGL), 1 et 2.

Les cellules ganglionnaires β , bêta, encore appelées naines à la suite des travaux de Cajal, sont de petite taille et ont des champs récepteurs de surface réduite. Elles constituent 80 à 90% du total des cellules ganglionnaires rétiniennes. Elles codent la composition chromatique du stimulus et la position précise des détails fins (acuité). Elles sont à l'origine d'une voie dite parvocellulaire (voie P) qui se termine dans les couches les plus dorsales du CGL, de 3 à 6.

Le nombre et la morphologie des cellules P et M changent en fonction de leur localisation au niveau de la rétine. En effet, Boycott et Wässle (1974) ont montré que le nombre de cellules P et M diminue et le diamètre de leur arborisation dendritique augmente avec l'excentricité. Les 10 % restant de la population totale des cellules de la rétine, sont constitués de cellules peu étudiées : les cellules γ , gamma. Elles forment la voie koniocellulaire (voie K) qui relaie dans les couches interlaminaires du CGL, ainsi elles jouent probablement un rôle important dans le transfert des informations le long de la voie rétino-géniculée.

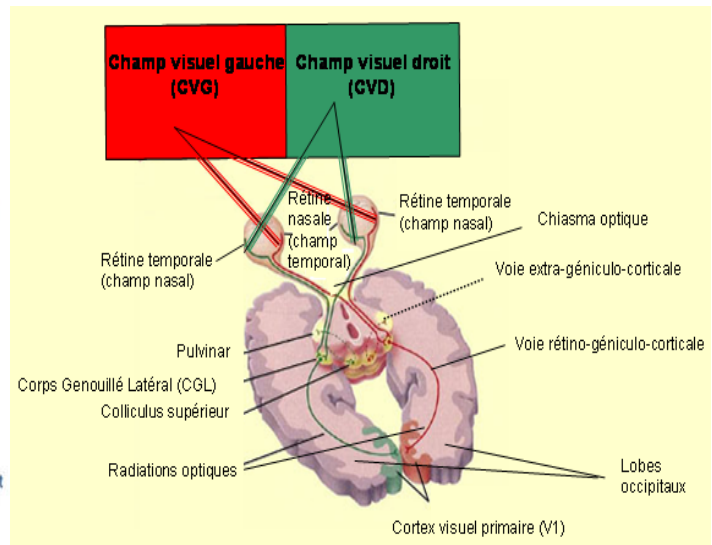
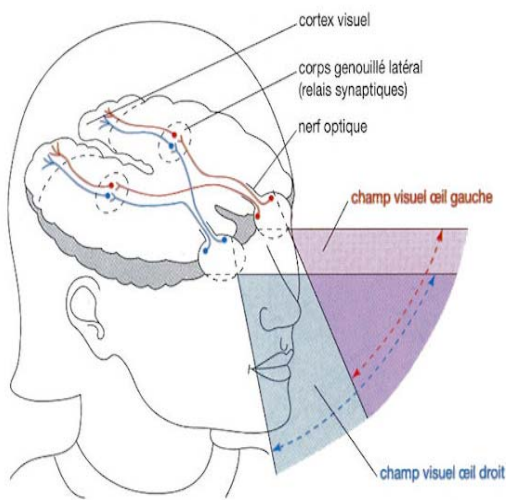
Elles se groupent en faisceaux qui convergent vers la papille, l'information lumineuse est alors véhiculée vers le nerf optique.

2. Le nerf optique

Les nerfs optiques, en arrière de la rétine, quittent les deux yeux au niveau de la papille et se réunissent en un carrefour sur la ligne médiane qui sépare les deux hémisphères cérébraux sous la face inférieure du cerveau, pour former le chiasma optique (Bear, 2002).

3. Le chiasma optique

Ce croisement permet en réalité de regrouper toutes les fibres issues des deux rétines qui correspondent à une même moitié du champ visuel. En effet, au niveau du chiasma optique, seuls les axones provenant de la rétine nasale croisent la ligne médiane, on parle alors de décussation partielle. Cette décussation assure le traitement croisé de l'information. Ainsi, l'information en provenance du champ visuel gauche (hémirétine droite) est véhiculée jusqu'à l'hémisphère droit tandis que l'information en provenance du champ visuel droit (hémirétine gauche) est acheminée dans l'hémisphère gauche. (Figures 2 a et b).



Figures 2 a) et b) : Organisation du système visuel. Les fibres visuelles empruntent des chemins différents selon leur origine rétinienne. En effet chaque rétine peut être divisée en deux parties : nasale et temporale. La rétine nasale de l'œil gauche et la rétine temporale de l'œil droit reçoivent les informations visuelles provenant de l'hémichamp visuel gauche, et inversement. Les nerfs optiques issus de chaque œil convergent au niveau du chiasma optique. Ensuite, selon leur origine rétinienne (nasale/temporale), les fibres vont prendre des voies différentes et donner naissance aux bandelettes optiques : les fibres provenant des rétines nasales de chaque œil changent d'hémisphère cérébral tandis que les fibres issues des rétines temporales restent dans le même hémisphère. Ainsi, les fibres issues de la rétine nasale de l'œil gauche et celles issues de la rétine temporale de l'œil droit (et recevant les informations provenant du champ visuel gauche) empruntent la même bandelette optique dans l'hémisphère cérébral droit et inversement (voir ci-après). (Figure a) tirée de Enseignement scientifique 1ère L Bordas ; Figure b) tirée de Gazzaniga, 2001, modifiée par Chokron, 2006).

II. Le système visuel cérébral : du chiasma au cortex visuel primaire

1. Tractus optique ou bandelettes optiques

A l'arrière du chiasma, les fibres des nerfs optiques se séparent à nouveau pour donner naissance aux tractus optiques ou bandelettes optiques. Les bandelettes de l'hémisphère droit contiennent toutes les fibres véhiculant l'image de l'hémichamp visuel gauche et inversement, c'est-à-dire que, contrairement au nerf optique, les bandelettes optiques contiennent des fibres provenant des deux yeux (Figure 3).

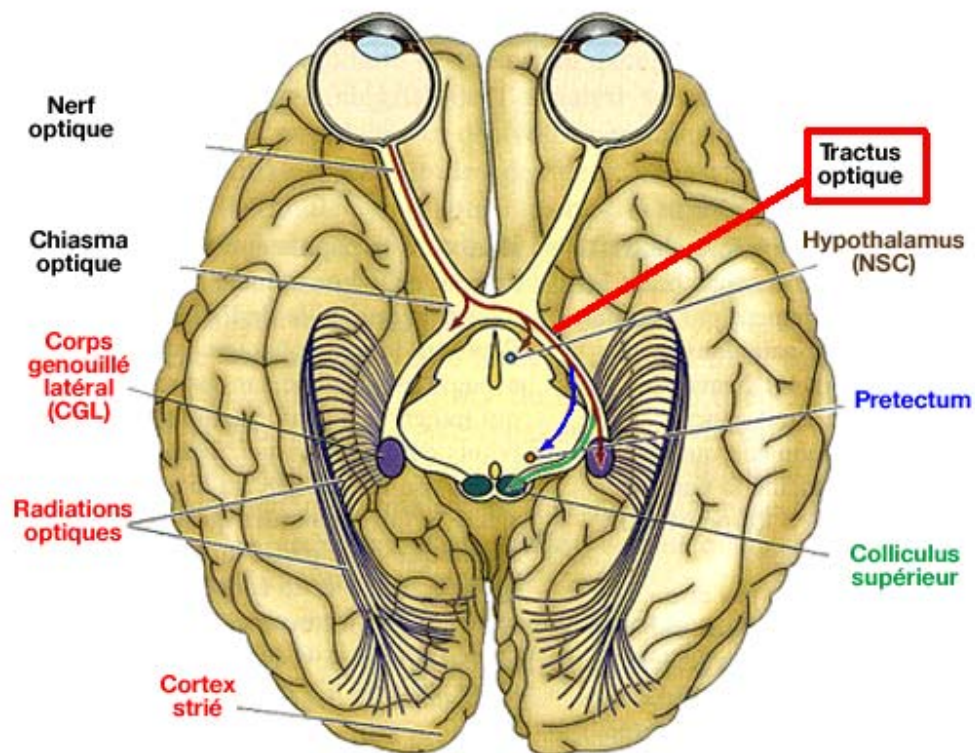


Figure 3 : Représentation axiale du système visuel : de l'œil jusqu'au cortex visuel primaire, le tractus optique est indiqué par une flèche rouge. (Figure tirée de Purves, 2005).

2. Corps genouillés latéraux

Le corps géniculé latéral (CGL) représente une escale du voyage de l'information visuelle entre le départ depuis les deux rétines jusqu'au cortex visuel.

Du fait de la décussation partielle au niveau du chiasma optique, chaque CGL relaie les informations issues du champ visuel controlatéral (Figure 2). Quatre-vingt-dix pour cent des fibres nerveuses du tractus optique contournent les pédoncules cérébraux et se projettent sur le CGL, situé au niveau de la partie postéro-inférieure du thalamus (Figure 4).

Le CGL est constitué de six couches : les couches 2, 3, et 5 de chaque CGL reçoivent les fibres provenant de l'œil ipsilatéral, tandis que les couches 1, 4 et 6 reçoivent les fibres en provenance de l'œil controlatéral. Ensuite, les informations de type « haut », « bas » et « droite », « gauche » sont conservées dans le CGL (Kolb et Whishaw, 2002).

Différentes couches constituent le CGL. Le CGL est formé d'une juxtaposition de deux couches ventrales dites couches magnocellulaires à grosses cellules (M), (couches inférieures 1 et 2) qui sont impliquées dans le traitement de l'information concernant le mouvement. Les neurones M sont plus sensibles que les neurones P aux hautes fréquences temporelles¹ et aux très basses fréquences spatiales² (ce qui permet de détecter les cibles visuelles en mouvement) et leurs axones ont des vitesses de conduction plus élevées. Puis de quatre couches dorsales (couches supérieures 3, 4, 5 et 6) à petites cellules (P) dites couches parvocellulaires. Ces neurones sont plus sensibles aux basses fréquences temporelles et aux hautes fréquences spatiales (ce qui permet de voir quelque chose avec précision). Ils sont impliqués dans le traitement de la couleur et de la forme. Et entre ces couches les espaces interlaminaires sont peuplés de très petites cellules formant les couches K. (Gazzaniga, 2001).

Ces neurones M, P et K ont une latence de réponse différente aux stimuli visuels : les cellules M commençant à répondre 50 millisecondes en moyenne après la présentation d'un stimulus, les cellules P répondant 20 millisecondes après les M, et les neurones K sont retardés de 10 millisecondes par rapport aux cellules P. Le traitement effectué par la voie magnocellulaire (sensible aux basses fréquences spatiales) est plus rapide que celui de la voie parvocellulaire (sensible aux hautes fréquences spatiales).

D'un point de vue fonctionnel, la voie dorsale se caractérise principalement par le transport rapide des informations achromatiques, globales, et dotées d'un fort contraste ; de plus elle est sensible aux stimuli de basses fréquences spatiales et de hautes fréquences temporelles.

¹
Fréquences temporelles : c'est le nombre d'événements au cours d'une unité de temps. Une scintillation présentée à n Hertz ou cycles par seconde comporte n éclairs (ou alternance entre des plages blanches et noires du stimulus) par seconde. Les neurones répondent préférentiellement à des hautes ou à des basses fréquences temporelles.

²
Fréquences spatiales : les basses fréquences spatiales correspondent à l'information globale d'une image, tandis que les hautes fréquences spatiales composent l'information locale et détaillée. Un réseau de fréquence spatiale égal à n cycles par degré comporte n barres blanches alternant avec n barres noires (de mêmes dimensions) dans 1 degré d'angle visuel. Plus il y a de barres, plus la fréquence spatiale est élevée, et plus l'image est détaillée.

La seconde voie, quant à elle, sert majoritairement à la transmission des informations colorées, détaillées de hautes fréquences spatiales et basses fréquences temporelles avec une vitesse de transmission plus lente. On comprend bien alors, l'implication et la contribution de ces deux voies, lors de la reconnaissance de scènes naturelles comme nous utilisons dans nos protocoles.

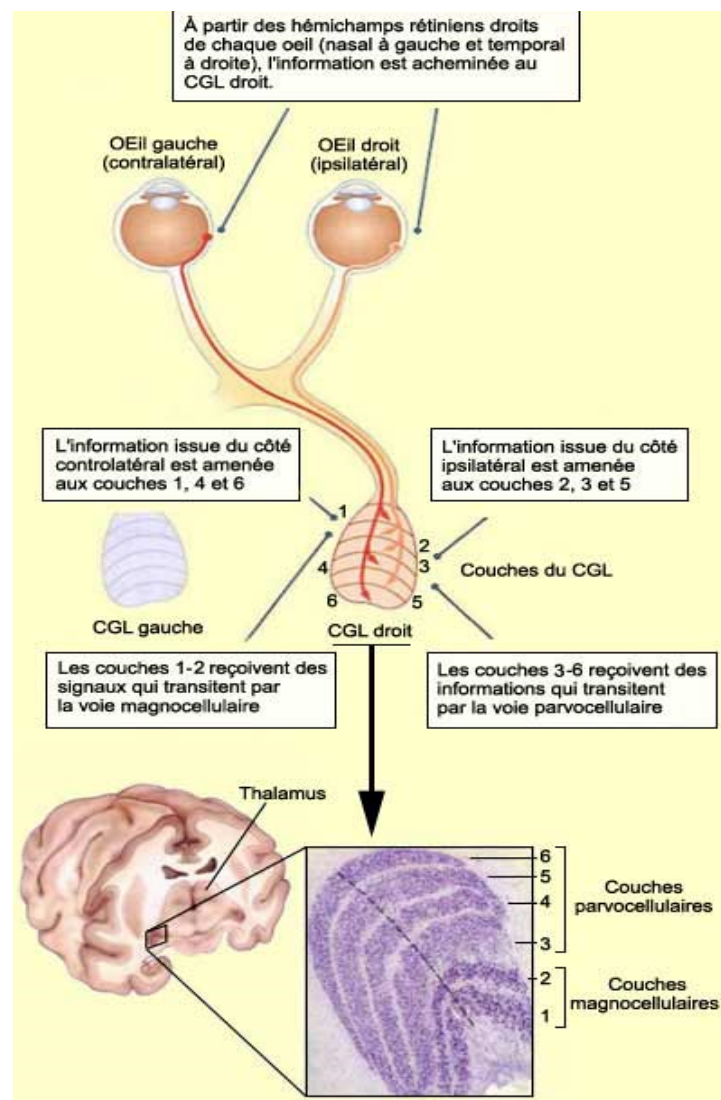


Figure 4 : Schématisation du cheminement de l'information visuelle de l'œil jusqu'au corps genouillé latéral, ainsi que les différentes couches le constituant. (Figure tirée de : Kolb et Whishaw, 2002).

3. Après le CGL : deux voies visuelles

Il existe plusieurs voies visuelles chez l'homme. La principale voie visuelle relie le CGL (partie dorsale du thalamus) à l'aire visuelle primaire (V1), puis aux aires visuelles extra-striées, « voie principale » car quatre-vingt pour cent des fibres arrivant au cortex visuel primaire passent par ce relais formant la voie rétino-géniculo-striée ou « voie visuelle primaire ».

La seconde voie plus rebelle, elle aussi issue du CGL, court-circuite V1 pour relier directement le CGL à l'aire MT+/V5 (Sincich, 2004). Cette voie sous-corticale aussi appelée voie rétino-tectale correspond aux dix pour cent des fibres du nerf optique qui se projettent sur les structures sous-corticales comme le pulvinar (au niveau thalamique) et le colliculus supérieur (au niveau mésencéphalique). Cette voie sous-corticale est décrite comme la voie des saccades : permettant de diriger les yeux vers une cible (orientation exogène de l'attention), d'analyser l'orientation d'un stimulus. C'est aussi la voie de la vision d'alerte, automatique, qui permet de réagir et donner une réponse motrice à un stimulus comme par exemple éviter un obstacle, avant même d'avoir accédé à la reconnaissance de celui-ci. Elle serait certainement la voie de la vision résiduelle en cas de lésion du cortex strié, nous reviendrons en détail sur cette voie visuelle dans le chapitre 3 de cette PARTIE abordant le *blindsight*.

Deux autres voies visuelles ont été décrites : la « voie photique » située entre le thalamus et le mésencéphale : la région du prétectum, assurant le réflexe pupillaire à la lumière. La « voie rétino-hypothalamique » au niveau du noyau supra-chiasmatique de l'hypothalamus, dans le diencéphale. Mais nous ne les décrirons pas en détail.

4. Radiations optiques de Gratiolet

Les fibres sortant du corps genouillé latéral constituent les radiations optiques, découvertes par Louis Pierre Gratiolet au 19^{ème} siècle, on les désigne aussi sous le nom de radiations de Gratiolet. C'est alors qu'on aboutit au niveau du cortex strié (aire visuelle primaire ou aire 17

de Brodmann ou encore V1 qui est très précisément la région lésée chez les patients présentant une hémianopsie latérale homonyme, trouble visuel que nous aborderons dans le troisième chapitre dont souffre les patients ayant participé aux études présentées dans cette thèse), sur les berges de la scissure calcarine du lobe occipital.

5. Cortex visuel primaire

Le cortex visuel n'est pas une aire unitaire mais il est maintenant bien admis qu'il est constitué d'un ensemble d'aires corticales en constante interaction, fonctionnellement différentes et toutes reliées les unes aux autres. L'organisation fonctionnelle de la vision au niveau cortical a d'ailleurs été comparée à « une raffinerie dont les multiples *pipe-lines* dessinent un véritable casse-tête qui évoque pour tout Parisien la façade du Centre Beaubourg, musée d'art contemporain » par Lionel Naccache (Le nouvel inconscient). (Cf figures 8 et 13 : représentation schématique détaillée de la voie dorsale et ventrale de l'œil au cortex).

Une trentaine d'aires visuelles situées sur l'ensemble du cortex ainsi qu'au niveau sous-cortical participent à la vision. Le cortex visuel comprendrait six aires distinctes, chacune d'entre-elles extrait une caractéristique visuelle donnée, devenant de plus en plus complexe depuis l'aire visuelle primaire V1 (par exemple les neurones de V1 sont sensibles à l'orientation) (Hubel et Wiesel, 1968, prix Nobel de médecine et de physiologie en 1981 concernant l'organisation en colonne d'orientation sélective des neurones du cortex visuel primaire).

Dans l'ensemble, et de façon très schématique, une stimulation visuelle présentée dans le champ visuel gauche (*vs.* droit) s'accompagne d'une activation post-chiasmatique : du CGL, du lobe occipital de l'hémisphère controlatéral, droit (*vs.* gauche).

III. Cortex occipital : Caractéristiques anatomiques et fonctionnelles

1. De V1 à V2

Le cortex visuel primaire (V1) est caractérisé par une représentation rétinotopique corticale (Figures 5 et 6). Le champ visuel est représenté d'une manière très fidèle, point par point au niveau du cortex visuel primaire (V1). Deux points voisins dans le champ visuel correspondent également à deux points voisins sur la surface corticale de V1. A l'exception de la macula qui est surreprésentée au niveau de V1. Elle occupe près de la moitié de la projection corticale (Hécaen, 1972), et ne serait représentée qu'une seule fois dans chaque hémisphère (Dubois-Poulsen, 1952). Mais des études ont remis en cause cette représentation rétinotopique. En effet, grâce à une étude en IRMf, certains auteurs ont pu mettre aussi, en évidence une représentation ispilatérale des champs visuels, c'est-à-dire une représentation du champ visuel gauche au niveau de l'hémisphère gauche ipsilatéral (et inversement) (Tootell, 1998).

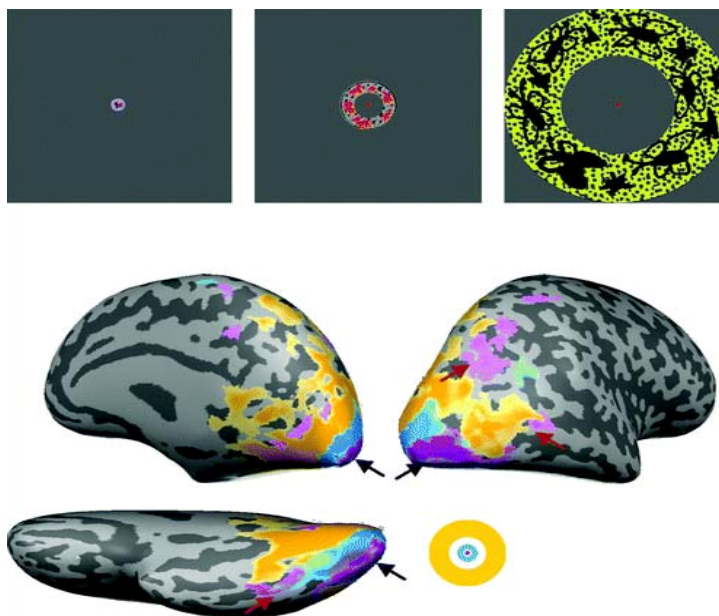


Figure 5 : Illustration de la représentation rétinotopique au niveau du cortex visuel primaire à l'aide de l'IRMf. La cible utilisée stimule le champ visuel central (violet puis bleu) puis s'étire de plus en plus vers le champ visuel périphérique (jaune), elle produit alors une activation au niveau du cortex visuel primaire postérieur (violet et bleu) et s'étend vers le cortex visuel plus antérieur (en jaune). (Figure tirée de Grill Spector et Malach 2004).

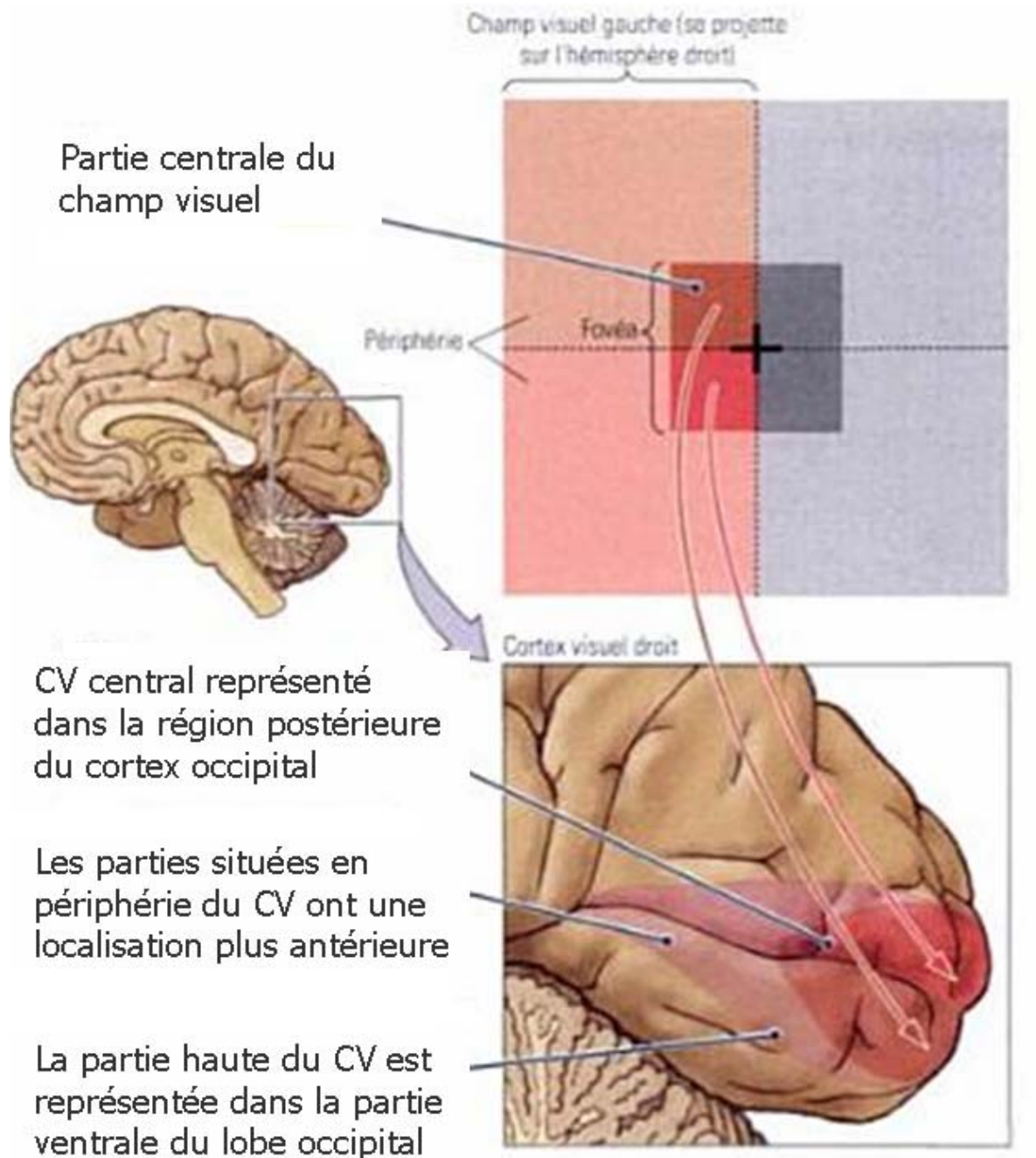


Figure 6 : Organisation topographique du cortex visuel primaire : V1, du lobe occipital droit. Illustrant la représentation rétinotopique de chaque point du champ visuel au niveau du cortex, avec une disproportion concernant le champ visuel central : la fovéa, expliquant la meilleure acuité visuelle en champ central. Ainsi que le croisement des voies visuelles qui a pour conséquence : la représentation du champ visuel gauche au niveau de l'hémisphère droit, la représentation du champ visuel central au niveau très postérieur du cortex visuel et la représentation du champ visuel périphérique au niveau des aires antérieures du cortex visuel (Figure tirée de Kolb et Whishaw, 2002).

Du fait de sa caractéristique rétinotopique nous pouvons donc facilement comprendre qu'une lésion de V1 engendre une amputation du champ visuel dont la taille dépend directement de son étendue au niveau du cortex. En d'autres termes, plus la lésion est importante au niveau de V1 plus l'amputation du champ visuel l'est aussi (ceci sera détaillé dans le chapitre 3, voir figure 42 et 43). Il faut noter également qu'il y a une zone au niveau du champ visuel de chaque œil qui n'est pas représentée, formant une zone aveugle appelée « tâche aveugle ». Nous possédons tous cette tâche aveugle dans notre champ visuel, sans en faire l'expérience consciente. Cette zone s'explique par le départ du nerf optique depuis la rétine, correspondant à la papille optique dépourvue de récepteurs. Comment toutes les informations visuelles peuvent-elles être aussi bien analysées et intégrées en un temps si court ? Cette question n'est pas élucidée et demeure l'un des défis majeurs des neurosciences modernes, cependant de nombreuses études dans le domaine nous permettent de mieux comprendre et de mieux concevoir le fonctionnement de la vision. Pour tenter de mieux appréhender ces processus, la majorité des études ont été réalisées sur le singe, ce qui a permis d'émettre par la suite plusieurs modèles pouvant être adaptés à l'homme. Ainsi le premier modèle émis par Van Essen et Maunsell (1983) fut l'arrangement hiérarchique des aires corticales visuelles qui comprend deux types de connexions entre les aires visuelles. Les connexions « *feedforward* » (pouvant se traduire par ascendantes) transportant l'information des aires inférieures (cortex occipital : aires V1/V2) aux aires supérieures (cortex pariétotemporal, aire MST,...), et les rétrocontrôles (*feedback*) pour le transfert inverse. D'après ce modèle, les neurones des aires inférieures V1 et V2 analysent en premier les données locales en 2D de la scène visuelle jusqu'aux représentations en 3D plus globales qui vont être acheminées vers les aires supérieures par des neurones ayant des propriétés de plus en plus sophistiquées. Un des meilleurs exemples est représenté par les neurones du cortex inféro-temporal qui ont des champs récepteurs de taille très importante et une sélectivité extrêmement spécifique. Ils reçoivent les informations combinées des aires V4 et TEO (étude réalisée chez le singe, résumée par Tanaka, 1996). Mais avec ce modèle il est impossible de combiner à la fois une analyse locale et globale du champ visuel. En effet, il convient parfaitement pour une vision claire et segmentée, ce qui n'est pas le cas d'une scène visuelle commune (où il y a un mélange permanent des informations générales et plus détaillées). Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'associer le traitement global à l'analyse locale.

C'est pourquoi Bullier (2001) a proposé un autre modèle (Figure 7). Il développe l'idée générale des connexions horizontales entre V1 et V2, ainsi que des rétrocontrôles provenant des aires supérieures (MT ou Médio-Temporales). Les aires V1/V2 contiennent la représentation la plus générale et large du champ visuel. Les rétrocontrôles issus de l'aire MT permettraient de moduler, à un stade précoce, les réponses des neurones de V1/V2 et donc « d'effacer » au fur et à mesure les anciennes données non réactualisées. Ces transferts rapides d'informations sont possibles grâce aux caractéristiques particulières des canaux M (issus de la voie magnocellulaire). Leur activité précède celle des canaux P (issue de la voie parvocellulaire) dans les différentes couches de V1, jusqu'aux niveaux supérieurs, ce qui permet une première analyse rapide de la scène visuelle. Elle serait ensuite modulée par les rétrocontrôles et l'arrivée des données visuelles détaillées. De plus, Liu et collaborateurs (2006) mettent en évidence que ces deux voies sont distinctes dans le cortex visuel primaire et permettent donc d'analyser séparément deux stimuli différents, chacun spécifique à une voie. Pour résumer, les principales notions de ce modèle sont : l'activation extrêmement rapide des aires de la voie magnocellulaire de manière à influencer les réponses amenées plus tardivement par la voie parvocellulaire des neurones des aires V1 et V2 par le biais d'un rétrocontrôle. Ce modèle implique donc une analyse préliminaire des informations globales puis détaillées. Là encore, une notion de temporalité et de hiérarchie est en jeu.

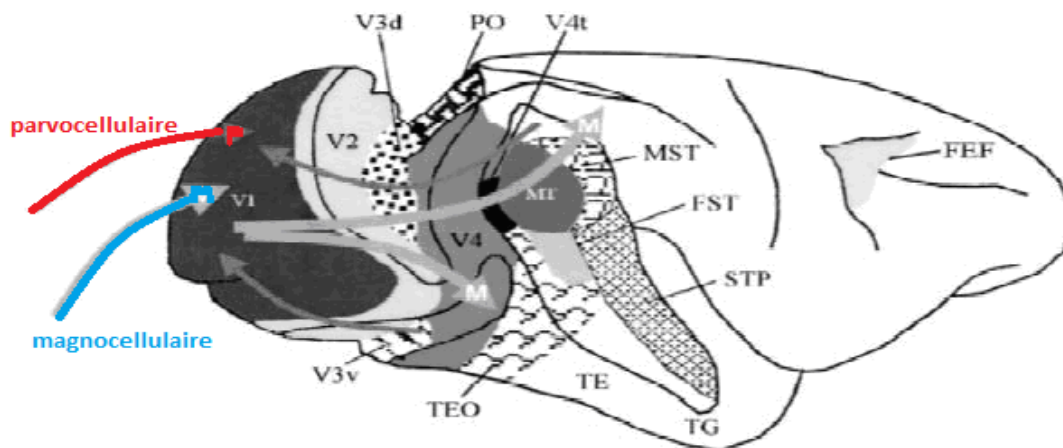


Figure 7 : Schéma représentant le modèle par itérations. Les larges flèches représentent le signal transporté par la voie magnocellulaire (indiquée par la lettre M) et les fines flèches représentent le signal transporté par la voie parvocellulaire (indiquée par la lettre P). Le signal magnocellulaire ascendant active les aires visuelles en premier. Ce signal est ensuite renvoyé sur les aires visuelles de plus bas niveau par les connexions feedbacks provenant des cortex pariétal et temporal, en même temps que le signal parvocellulaire ascendant active les aires visuelles (Figure tirée de Bullier, 2001b).

2. Le cortex visuel associatif ou cortex extra-strié de V2 à V6

Le cortex visuel strié est entouré du cortex extra-strié composé de l'aire secondaire (V2 ou aire 18 et 19 de Brodmann) et les aires associatives (V3, V4, V5 ou MT, etc) (Figure 8). Après le cortex strié, on trouve environ une douzaine d'aires corticales différentes qui contribuent toutes à la perception visuelle. Ces autres aires visuelles du lobe occipital sont regroupées sous l'appellation de cortex extra-strié ou cortex visuel secondaire (Bear, 2002).

Les informations concernant la couleur, la forme et le mouvement arrivant au cortex strié par la voie rétinogéniculée, sont acheminées vers la région V2 (aire 18 de Brodmann). On distingue à ce niveau deux faisceaux de la voie parvocellulaire : l'un sensible à la couleur, l'autre sensible à la forme (Kolb, 2002). L'aire V3, recevant les afférences de V2, est située autour de V2. Les fibres issues du cortex extra-strié rejoignent d'autres régions visuelles du cortex occipital puis les lobes pariétal et temporal, formant ainsi les voies dorsale et ventrale (détaillées ci-après paragraphe 1.2).

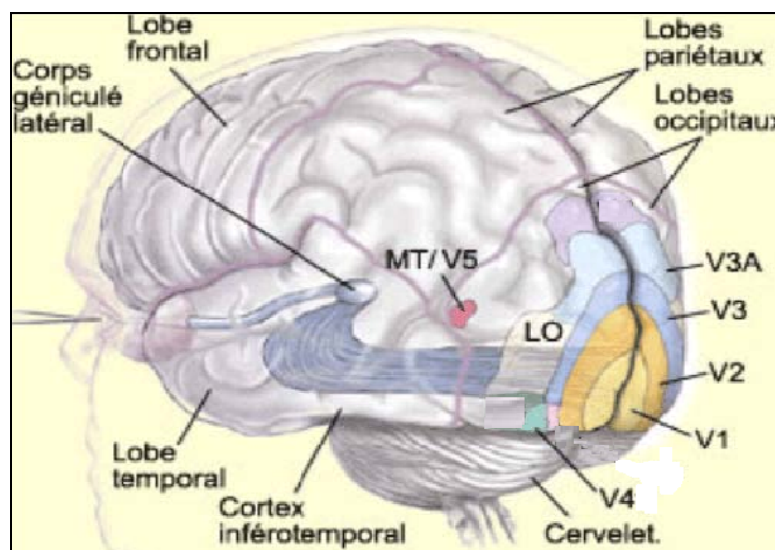
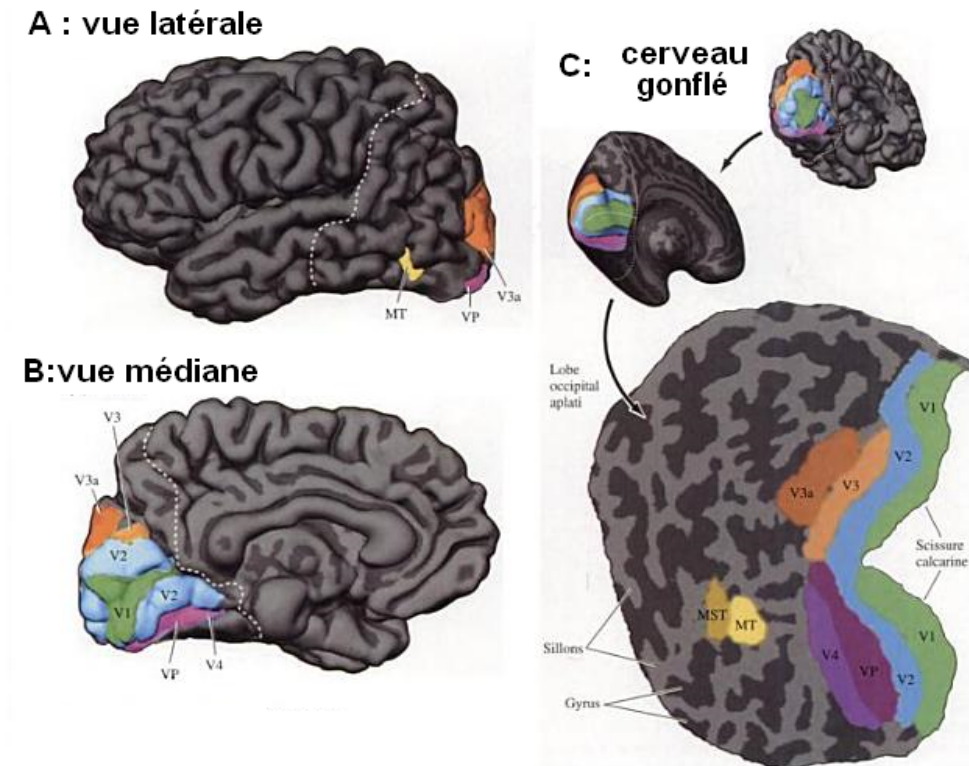


Figure 8 : Représentation des aires striées et extra-striées : l'aire V1 est représentée en jaune, V2 en orange, V3 en bleu, V4 en vert, V5 en rose. (Figure tirée de http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html).

Dès les années 1970, l'étude du singe-hibou et du macaque ont montré que le cortex visuel associatif est constitué de plusieurs aires cérébrales séparées de l'aire V1 par l'aire V2. A l'aide d'électrodes, certains chercheurs ont pu enregistrer l'activité électrique de cellules du cortex extra-strié de singes durant laquelle ils présentaient différents stimuli visuels : couleurs, barre d'orientation variable, points lumineux en mouvement. La plupart des cellules de deux autres aires voisines, les aires V3 et V3A (chez l'homme) sont sensibles aux formes, mais elles ne sont pas sensibles à la couleur des stimuli. L'aire V4 répond sélectivement à la couleur du stimulus présenté indépendamment de la direction de son mouvement. Une lésion de cette région (de manière bilatérale en général) s'accompagne d'une perte de la perception des couleurs appelée achromatopsie, alors que les autres aspects de la vision fonctionnent parfaitement. Les patients rapportent souvent percevoir en nuances de gris. Contrairement à l'aire V4, l'aire MT (Middle Temporal Area) ou aire V5 chez l'homme, l'aire temporelle moyenne est une région dont toutes les cellules sont sensibles au mouvement et pour la plupart spécifiques au traitement de certaines directions, et dont aucune n'est sensible à la couleur des stimuli (Figure 9). Ces données ont été confirmées grâce à l'imagerie par résonance magnétique (Tootell et *al.*, 1995). Chez l'homme une lésion bilatérale de V5 cause un déficit sévère de la perception des mouvements (Zeki, 1991). Ce trouble est appelé akinétopsie, c'est-à-dire que le patient est incapable de percevoir le mouvement, il perçoit les mouvements comme une suite de photographies, ou comme une scène en mouvement, éclairée par des stroboscopes, donnant alors une impression saccadée. Au niveau anatomique V5 pourrait correspondre aux confins des lobes : occipital, pariétal et temporal dans une région frontière commune aux aires 19 et 37 de Brodmann (Zeki, 1991).



Figures 9 : Représentation corticale de plusieurs aires visuelles du cortex visuel humain mises en évidence par IRMf. A et B, vues latérales et médiane (vue de la face externe et interne de l'hémisphère gauche) du cerveau humain, montrant l'emplacement du cortex visuel primaire (V1), et des aires V2, V3, VP : aire ventrale postérieure, V4, MT : aire temporale moyenne, MST : aire temporale supérieure médiane. C, vue du cortex gonflé, déplié et aplati (zones claires : gyrus, zones foncées : sillons) des aires visuelles du lobe occipital délimitées à l'aide d'une tâche de rétinotopie. (Figure modifiée d'après Sereno et *al.*, 1995).

L'aire visuelle V6 se situe au niveau du sulcus pariéto-occipital. Certains auteurs (Galletti, Fattori, Gamberini, Kutz ; 1999) ont localisé cette aire fonctionnelle chez quatre macaques éveillés, au niveau du lobule pariétal supérieur (nous reviendrons sur cette région chez l'homme lors du chapitre sur la spécialisation hémisphérique dans le traitement des fréquences spatiales). L'aire V6 semble impliquée dans la sélection de cibles durant la recherche et l'exploration visuelle, dans le contrôle moteur du bras lors de la préhension de cibles visuelles situées dans le champ visuel périphérique, ainsi que lors de mouvements telle que la marche. Cardin et Smith (2011) ont mis en évidence que l'aire V6, permettrait l'estimation de la position des cibles situées autour du sujet lors de ses déplacements (Figure 10).

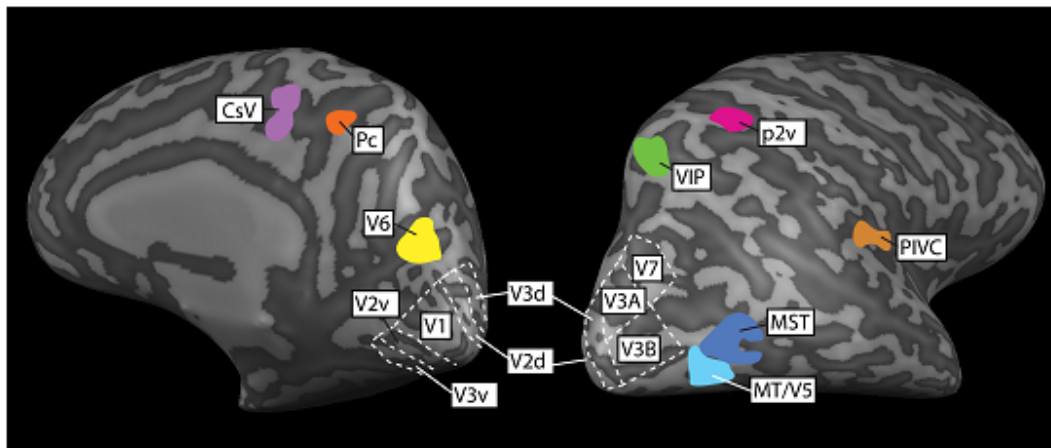


Figure 10 : Représentation de l'hémisphère droit du cerveau gonflé et aplati (vue médiane à gauche et vue latérale à droite) avec les régions d'intérêt de cette étude, la région de V6 est représentée en jaune. (Figure tirée de Cardin et Smith, 2011).

3. La voie ventrale et la voie dorsale : deux voies visuelles pour deux types de traitement

Si l'on ne connaît pas encore tout le détail du cheminement des signaux visuels, parmi la trentaine d'aires impliquées dans la vision au-delà du cortex strié, depuis les travaux de Ungerleider et Mishkin (1982) et Haxby et *al.*, 1991 on dispose cependant de nombreuses données en faveur d'un acheminement selon deux grands faisceaux : le faisceau longitudinal inférieur ou voie ventrale ou encore voie du « quoi » (Kanwisher et *al.*, 2001) et le faisceau longitudinal supérieur ou voie dorsale ou encore voie du « où ».

En effet le principe de regroupement des neurones pré-corticaux impliqués dans le système visuel (voie parvo et magnocellulaire) s'applique également au niveau des aires corticales (Figure 11).

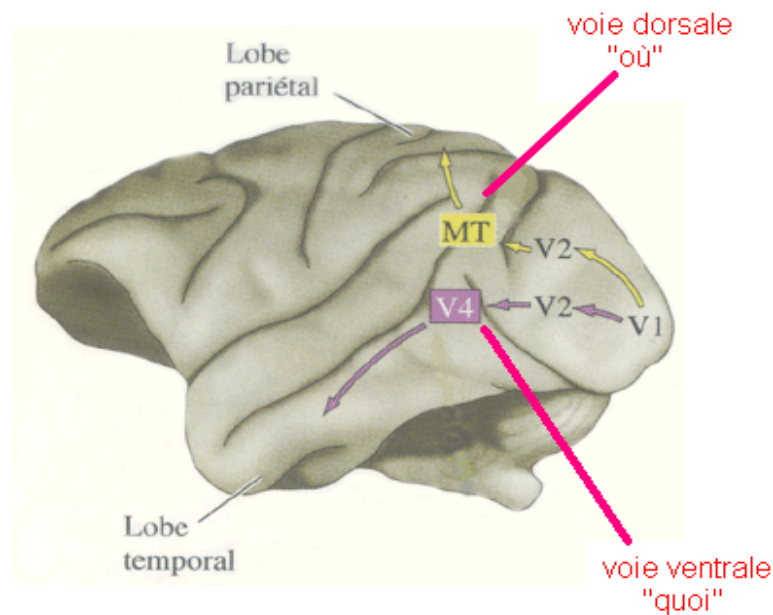


Figure 11 : Représentation des deux voies fonctionnelles visuelles partant du cortex visuel primaire : la voie ventrale, aboutissant dans le lobe temporal impliquée dans la reconnaissance des objets, représentée par des flèches violettes sur le schéma et la voie dorsale ; aboutissant dans le lobe pariétal impliquée dans la vision spatiale, représentée par des flèches jaunes (Figure tirée de Purves, 2005).

3.1. La voie ventrale ou occipito-temporale, circuit du « quoi »

« Quelle est l'information qui est présentée devant mes yeux ? ». C'est le faisceau longitudinal inférieur ou voie ventrale qui aurait la mission fondamentale de répondre à cette question. Il permettrait la perception consciente, la reconnaissance et l'identification des objets en traitant leurs propriétés visuelles « intrinsèques » comme leur forme ou leur couleur. Ce faisceau appelé aussi voie du « quoi » aurait pour origine les régions sensibles aux formes au niveau de V1 puis se dirigerait vers V2, V3, puis l'aire V4 (impliquée dans la reconnaissance des formes et des couleurs) qui reçoit des fibres issues de la région de V2. Les informations chemineraient ventralement vers le pôle postérieur du lobe temporal pour arriver enfin au niveau du cortex inféro-temporal afin de finaliser le processus de reconnaissance (Kanwisher et *al.*, 2001). L'aire IT située au niveau du cortex inféro-temporal reçoit les projections de l'aire V4 et serait une zone cruciale dans la reconnaissance des formes (Bear, 2002).

Cette voie est activée par les cellules M, P et K du CGL (évoqués précédemment) avec une plus grande proportion de cellules P. La participation soutenue des cellules P est naturelle selon Bullier (1998), puisque la discrimination des couleurs et la perception des détails (caractérisant la voie parvocellulaire) sont des facteurs importants lors de la reconnaissance des formes. C'est un système tonique du fait du mode de réponse plus lent et plutôt continu des cellules parvocellulaires. Correspondant d'un point de vue fréquentiel à un filtre passe-haut au niveau spatial, il traiterait préférentiellement les Hautes Fréquences Spatiales (Cf Chapitre 2 point 3, chapitre abordant la spécialisation hémisphérique pour le traitement visuel des scènes naturelles) et d'un point de vue temporel à un filtre passe-bas, il permettrait ainsi l'accès à une vision détaillée de la forme.

3.2. La voie dorsale ou occipito-pariétale, circuit du « où »

« Où se trouve t'il, le faisceau longitudinal supérieur, appelé aussi voie dorsale ? ». C'est une excellente question qui tombe à pic, puisque c'est lui-même qui va nous permettre d'y répondre. En effet, cette voie dorsale contribuerait à la perception du mouvement et serait impliquée lors de tâches de coordination visuo-motrice, dans la perception d'objets en mouvement, au cours du déplacement de l'individu dans son environnement et permettrait le contrôle visuo-moteur sur les objets en traitant leurs propriétés « extrinsèques ». Ces propriétés comme leur position spatiale, leur orientation ou leur taille sont nécessaires à la préhension. Les aires corticales du système dorsal apparaissent comme des aires où se développent progressivement des représentations de plus en plus complexes du monde visuel. La voie du « où » se dirigerait de V1 puis vers V2, V3A (traitement des formes), et V5 (traitement des mouvements) (Kolb et Whishaw, 2002) jusqu'au lobe pariétal. Il est intéressant d'ajouter que l'aire V5 localisée dans le lobe temporal moyen et l'aire MST située au niveau du lobe pariétal reçoivent successivement les projections magnocellulaires de V2, ce qui nous apporte un élément sur le type d'information qui sont acheminées dans ces régions (Figure 12).

Cet ensemble d'aires sous le contrôle quasiment exclusif des neurones de types M du CGL traite les données spatiales du stimulus, le « où ». C'est un système phasique de part le caractère transitoire et rapide des réponses des cellules magnocellulaires. Du point de vue

fréquentiel il possède des caractéristiques de filtrage inverse au système occipito-temporal, correspondant à un filtre passe-bas au niveau spatial, en effet il traiterait préférentiellement les Basses Fréquences Spatiales (Cf Chapitre 2) et à un filtre passe-haut au niveau temporel. Ce qui implique une grande rapidité des réponses dans cette région (Bullier, 1998).

Lors d'une lésion du cortex strié, l'aire V5 serait quand même activée par des projections sous-corticales donnant l'information sur le mouvement des cibles (et non sur leur nature). C'est ce phénomène qui serait probablement lié au *blindsight*, sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 3. Le fait que les structures probablement responsables du phénomène inconscient de *blindsight* (*Blindsight* : capacités visuelles résiduelles dans le champ révélé aveugle à l'examen), soient localisées principalement dans la voie dorsale laisse supposer que la vision consciente nécessite la présence des aires corticales de la voie ventrale.

Il apparaît donc que les aires de la voie ventrale et celles de la voie dorsale traitent des aspects différents de la scène visuelle. Ces divergences anatomo-fonctionnelles sont confirmées par des expériences d'imagerie fonctionnelle chez l'homme (Haxby, 1994). Milner et Goodale (1995) parlent de vision pour 'percevoir' « *vision for perception* » : pour la voie ventrale, et de vision pour 'agir' « *vision for action* » : pour la voie dorsale. Ceci est intéressant et nous permettra plus tard lors de la partie abordant le *blindsight* (Chapitre 3, de cette partie) de mieux expliquer l'« *action blindsight* ». Comprendre pourquoi ce type de *blindsight* est plus répandu mais aussi pourquoi il nécessite une action motrice. Dès lors, on peut supposer un lien étroit entre le *blindsight*, la voie dorsale ainsi que les structures sous-corticales.

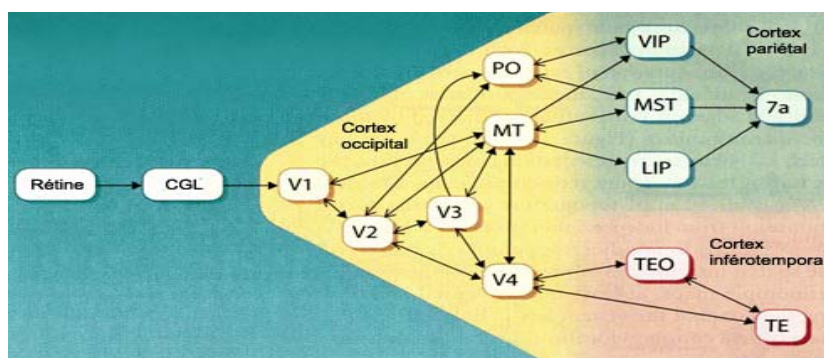


Figure 12 : Représentation schématique détaillée du cheminement de l'information visuelle de l'œil au cortex occipital (en jaune) en lien avec le cortex pariétal (en vert) illustrant la voie dorsale et avec le cortex inféro-temporal (en rose) illustrant la voie ventrale. (Figure tirée de http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html).

Ces voies corticales semblent être le prolongement des voies géniculostriées adoptant la même organisation. La voie magnocellulaire alimenterait alors de manière préférentielle la voie dorsale et la voie parvocellulaire celle de la voie ventrale. Cependant, l'information n'est pas autant divisée. La présentation dichotomique faite jusqu'alors, a permis de mieux discriminer et mieux comprendre les rôles de chacune de ces voies visuelles. Mais, en réalité, elles sont en constante interaction, la voie ventrale et la voie dorsale ont toutes les deux accès aux informations provenant du système magno et parvocellulaire.

Nous allons maintenant faire le lien entre l'anatomie des voies visuelles et leur rôle fonctionnel que nous venons d'aborder, en décrivant des études permettant d'étudier le fonctionnement cognitif de sujets sains lors de protocoles mettant en jeu la reconnaissance visuelle. Les études que nous allons présenter ci-après se sont intéressées aux régions cérébrales qui gèrent la reconnaissance visuelle.

Nous commencerons par décrire le « LOC » (Lateral Occipital Complex) complexe occipitolatéral, qui est une aire située au niveau du cortex occipital (de manière latérale), et qui répond de manière constante à la présence d'une forme visuelle cohérente, Malach et collaborateurs, (1995).

4. Le « LOC » cortex occipital latéral

L'accès à la reconnaissance des objets suit une hiérarchie entre différentes aires visuelles du cortex. L'activation s'enchaîne en cascade, le long de la surface corticale, en partant du cortex visuel primaire V1 jusqu'au lobe occipital antérieur et ventral. C'est à l'aide de l'IRMf que Malach et ses collaborateurs, en 1995, ont mis en évidence le LOC (complexe latéral occipital) (Figure 13). Cette région s'active de la même manière pour tous les objets, familiers, non familiers, indéfinissables. Elle ne paraît donc pas impliquée dans les étapes finales de la reconnaissance des objets, mais bien dans une étape intermédiaire d'analyse de forme. Cette région au sein de la voie ventrale reste encore mystérieuse. Elle est communément divisée en deux régions : une sous-région latérale et postérieure : localisée le long du cortex occipital et en postérieur de MT (LO) et une sous-région ventrale et antérieure : au niveau de la partie postérieure du gyrus fusiforme et de la scissure occipito-temporale (Grill Spector et *al.*, 1999).

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le cortex visuel primaire est formé de neurones à « petits champs » récepteurs visuels organisés géographiquement et fidèlement, suivant le champ visuel correspondant (Serenio et *al.*, 1995). La représentation de cette aire, V1 est dite rétinotopique. Inversement, les neurones des régions plus antérieures, c'est-à-dire de plus « haut niveau » de traitement répondant à des caractéristiques plus complexes telles que la forme de l'objet (Malach et *al.*, 1995) ou la catégorie de l'objet (Kanwisher et *al.*, 1997), ne répondraient pas à cette représentation rétinotopique selon certains auteurs (Tootell et Hadjikhani, 2001). Pourtant, cette région du LOC posséderait, elle aussi des caractéristiques rétinotopiques. En effet, d'autres auteurs ont pu observer un effet de la latéralisation de la présentation du stimulus avec une réponse controlatérale au stimulus plus importante par rapport à la réponse ipsilatérale (Grill Spector et *al.*, 1998). De plus, Sayres et Grill Spector, (2008) ont mis en évidence que le champ visuel inférieur controlatéral est la partie du champ la plus représentée au sein de LO. En effet la région LO est très réactive aux objets présentés en dessous d'un point de fixation (par rapport à ceux apparaissant au-dessus du point). Par ailleurs, l'activité de cette région est plus importante pour les objets présentés en fovéa par rapport à ceux plus excentrés. Pour conclure, ces résultats montrent une corrélation entre la position d'apparition de l'objet et la réponse neuronale dans LO, par conséquent une organisation rétinotopique de cette région cérébrale.

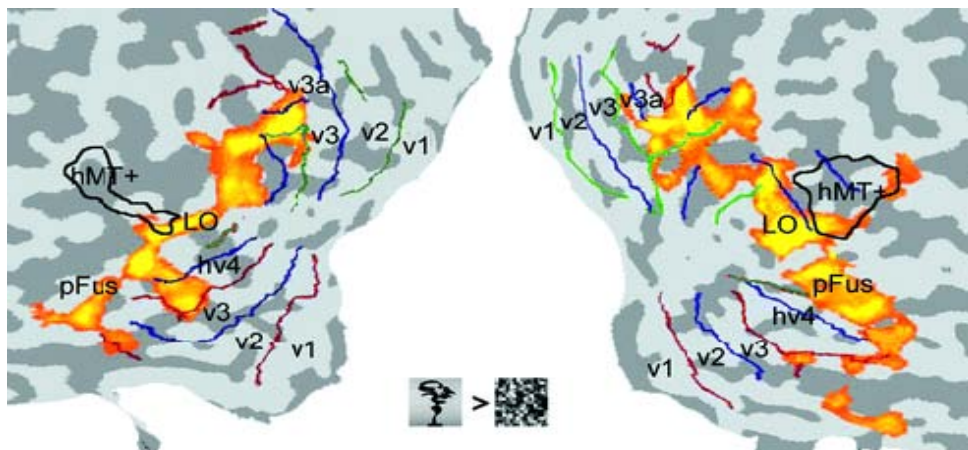


Figure 13 : Localisation fonctionnelle au niveau d'un cortex déplié et aplati des aires V1, V2, V3, V4, MT, et du LO : cortex latéral occipital, lors de l'activation corticale pour la condition objet vs non objet. (Figure tirée de Grill Spector et Malach 2004).

Par ailleurs, Amedi, Jacobson, Hendler, Malach, Zohary, (2002) ont montré à l'aide d'une étude en IRMf qu'à l'intérieur de la région du LOC, une zone s'activait à la fois lorsque les objets sont vus ou touchés. Ils l'ont alors appelée LOtv pour le cortex occipital latéral de la vision et du toucher. Ils précisent que cette région s'active préférentiellement pour les objets qu'on peut attraper, que pour les visages ou les maisons par exemple. De plus, les caractéristiques auditives des objets ne permettent pas d'activer cette zone, ce qui fait sa spécificité. Ceci amène les auteurs à conclure, que cette région LOtv est impliquée dans la reconnaissance des formes géométriques et des objets. De plus, Amedi et *al.*, 2010 ont mis en évidence chez huit aveugles congénitaux, que cette région du LOtv s'activait lorsqu'ils touchaient les objets, tout comme chez les sujets voyants. Ces résultats suggèrent que l'imagerie mentale visuelle n'est pas nécessaire pour obtenir une activation des aires visuelles corticales lors d'une tâche tactile. Ces études sont importantes et nous amènent à mieux comprendre les processus de compensation mis en place lorsque la vision est troublée chez certains patients, et le lien pré-existant entre certaines modalités sensorielles, notamment la vision et le toucher. Nous reviendrons sur ce point au cours du chapitre 1 de la partie 3 de cette thèse, concernant la réorganisation corticale.

Comme nous venons de le voir, les aires visuelles corticales fonctionnent avec une certaine hiérarchie. Il est important de la considérer pour aborder la reconnaissance visuelle de scènes naturelles (traitement visuel de haut niveau). Une vision normale dépend alors de l'intégration des informations de toutes ces aires. Malgré l'existence d'une multitude d'aires visuelles spécialisées, véritable patchwork fonctionnel au niveau du cortex occipital, nous accédons à une perception du monde de manière rapide et unitaire. C'est donc l'interaction de ces aires entre elles qui nous permet d'avoir une image unifiée, étape indispensable pour avoir conscience de l'environnement visuel qui nous entoure.

Résumé

Le traitement de l'information visuelle débute au niveau de l'œil et s'achève au niveau des aires corticales visuelles, voire même au-delà lorsque l'information visuelle déclenche un jugement ou une action.

L'information rétinienne est compressée jusqu'aux cellules ganglionnaires M et P. Elles se regroupent en faisceaux qui convergent vers la papille, l'information lumineuse est alors véhiculée vers le nerf optique. Puis l'information se croise partiellement, au niveau du chiasma optique. Ce qui permet en réalité de regrouper toutes les fibres issues des deux rétines qui correspondent à une même moitié du champ visuel. Les axones des cellules M, magnocellulaires, sont destinés aux couches les plus ventrales du corps genouillé latéral (CGL). Les cellules P, parvocellulaires se terminent dans les couches les plus dorsales du CGL.

Le CGL est formé de couches magnocellulaires à grosses cellules (M), et de couches parvocellulaires à petites cellules (P). Les couches M sont impliquées dans le traitement des hautes fréquences temporelles et de très basses fréquences spatiales. Les neurones P sont plus sensibles aux basses fréquences temporelles et aux hautes fréquences spatiales. Sortent du CGL les radiations de Gratiolet qui amènent l'information jusqu'au cortex visuel primaire. Ce dernier à une représentation rétinotopique (c'est-à-dire que le champ visuel est représenté d'une manière très fidèle, point par point au niveau du cortex visuel primaire : V1). Au-delà de V1, l'information sera ensuite projetée dans les nombreuses aires visuelles en suivant principalement deux voies corticales : la voie ventrale et la voie dorsale. La voie dorsale qui rejoint le cortex pariétal est composée principalement de projections de cellules M. Elle est spécialisée dans le traitement spatial de l'information visuelle. La voie ventrale qui rejoint le cortex temporal est composée plus spécifiquement de cellules P. Elle est spécialisée dans la reconnaissance de l'information visuelle. Dans le chapitre suivant nous verrons comment cette hiérarchie, dans le traitement de l'information visuelle permet de comprendre la reconnaissance visuelle.

Nous avons rapidement présenté les structures anatomiques qui sous-tendent le traitement visuel et ceci jusqu'à l'étape ultime qui est : l'accès à la signification, c'est-à-dire la reconnaissance de ce qui est perçu. Nous abordons dans le chapitre suivant les mécanismes cognitifs qui gèrent le traitement visuel et plus particulièrement la reconnaissance visuelle de scènes. La reconnaissance est un mécanisme qui permet de donner du sens à ce qui est perçu. Nous allons le traiter cette fois selon une approche cognitive. Nous allons par conséquent détailler dans ce second chapitre les études comportementales menées sur la reconnaissance visuelle. Nous aborderons la reconnaissance de scènes visuelles naturelles chez les sujets normaux. Afin de mieux comprendre les processus de traitement impliqués lors de la reconnaissance de scènes, nous nous appuierons sur la distinction du traitement global/local (des éléments composant une scène visuelle). Nous rapprocherons ensuite ce principe à celui du traitement *coarse-to-fine* des fréquences spatiales (composant elles aussi une scène visuelle). Nous verrons qu'une spécialisation hémisphérique au niveau du traitement cortical prend forme pour le traitement des fréquences spatiales contenues dans une scène visuelle naturelle, et que cette spécialisation est modulable en fonction du sexe et de l'âge des participants.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT VISUEL : ASPECTS COGNITIFS

Ce second chapitre présente les études comportementales étudiant la reconnaissance visuelle et particulièrement le traitement des scènes naturelles, d'un point de vue fonctionnel et cognitif.

I. Traitement Global/Local

1. Reconnaissance visuelle « ultra » rapide chez les normaux

L'être humain est capable de reconnaître quelque chose en bien moins d'une seconde (Grill Spector et Kanwisher, 2005, Thorpe et Fabre-Thorpe 2001) (Figure 14). Cependant les processus, les mécanismes neuronaux qui sous-tendent cette fonction sont encore très mal cernés. L'enregistrement de potentiels évoqués chez des sujets sains a permis de mettre en évidence que la catégorisation de scènes naturelles est très rapide. Cent cinquante millisecondes au niveau du scalp, et 390 millisecondes pour ce qui est des temps de réaction enregistrés, lors d'une tâche en go/no go de détection d'animaux contenus dans une scène visuelle présentée pendant seulement 20 millisecondes (Thorpe, Fize et Merlot, 1996). Ceci est d'autant plus vrai lorsque les animaux à détecter sont présentés dans leur environnement naturel (par exemple : un zèbre dans la savane africaine *vs* un zèbre dans une ville comme New York) (Drewes, Trommershäuser et Gegenfurtner, 2011). De plus, les auteurs ont utilisé une tâche de catégorisation, dans laquelle les participants devaient indiquer la présence d'un animal, dans une scène apparaissant 32 millisecondes à l'écran. Ils ont observé le même résultat lorsque deux images étaient flashées simultanément. Les auteurs concluent que la catégorisation d'images naturelles (processus de haut niveau) peut se faire par un traitement parallèle (Rousselet, Fabre-Thorpe et Thorpe, 2002). Ils ont également observé qu'un entraînement ne permet pas de diminuer ce temps de latence de 150 millisecondes au niveau

du scalp. Ainsi, même si les images n'ont jamais été vues auparavant, le système fonctionne de manière optimale, avec un traitement très rapide dès la première présentation de l'image (Fabre-Thorpe, Delorme, Marlot et Thorpe, 2001). De plus cette reconnaissance prend moins de 100 millisecondes pour être effectuée, quel que soit l'angle de vue de présentation de l'objet (Biederman et *al.*, 1974 ; Thorpe et *al.*, 1996, Guyonneau, Kirchner, Thorpe, 2006) (Cf Figure 15).

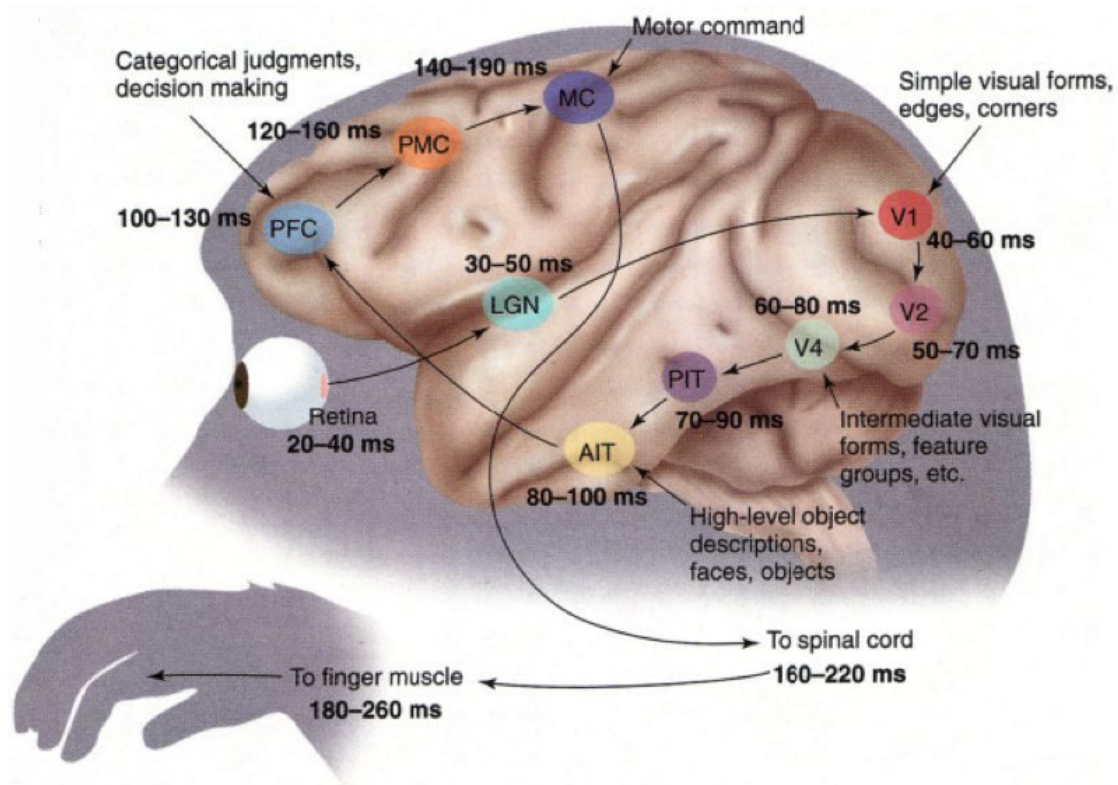


Figure 14 : Schématisation des différentes étapes parcourues par l'information visuelle depuis la rétine jusqu'à la réponse motrice. Les estimations de latence données ici en millisecondes sont basées sur des données électrophysiologiques chez le singe, il faut donc probablement ajouter quelques millisecondes pour arriver aux temps que l'on pourrait obtenir chez l'humain. Le premier temps indiqué pour chaque étape correspond aux latences des premières réponses observées, et le second correspond à une valeur moyenne. (Figure tirée de Thorpe et Fabre-Thorpe, 2001).

Le plus souvent, le traitement de l'information visuelle est étudié à l'aide de tâches de détection de stimuli (i.e., indiquer la présence d'un stimulus), ou de tâches de catégorisation de stimuli (i.e., identifier un stimulus).

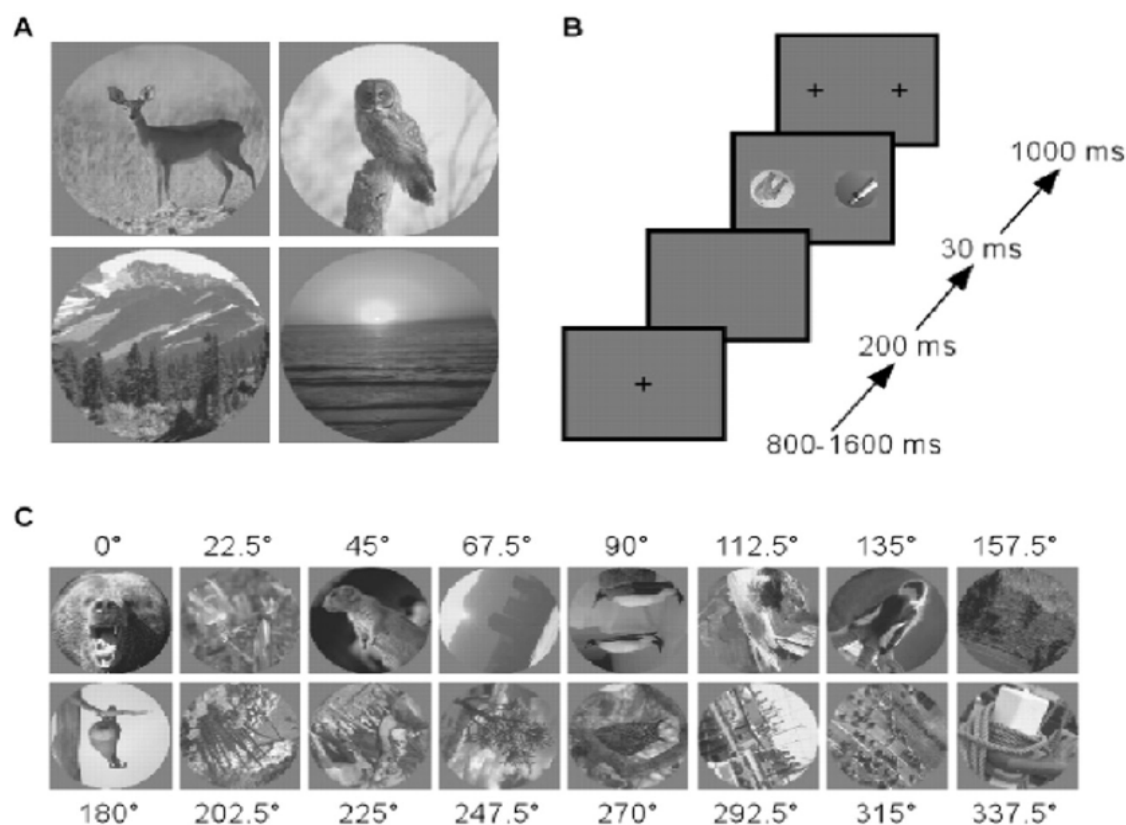


Figure 15 : (A) Selection de stimuli en fonction de l'orientation principale de l'image. Les cibles : images d'animaux sont donc choisies en fonction de leur orientation : en haut à gauche verticale (les pattes) ou perché sur un sommet (l'oiseau en haut à droite). Les distracteurs sont des images de paysage avec une orientation verticale (des arbres en bas à gauche) ou horizontale (en bas à droite). (B) Exemple d'un essai : le point de fixation apparaît durant une période comprise entre 800 et 1600 ms (période pseudoaléatoire) suivi d'un écran blanc durant 200ms, puis de la présentation simultanée de deux images de scènes naturelles une dans le champ visuel gauche et une dans le champ visuel droit durant 30 ms. Les images sont suivies d'un écran gris avec 2 croix de fixation à l'endroit où les images sont apparues durant l'essai. (C) Exemples d'images utilisées, présentées dans 16 orientations différentes l'angle de rotation de l'image varie de 0° à 337.5° par palliés de 22.5° (dans le sens des aiguilles d'une montre). (Figures tirées de Guyonneau, Kirchner, Thorpe, 2006).

Bien que quelques auteurs (Grill-Spector et Kanwisher, 2005) aient suggéré que la détection et la catégorisation sont sous-tendues par un processus commun indissociable (i.e., dès l'instant où l'image est détectée elle est aussitôt catégorisée), de plus en plus de données laissent à penser que deux mécanismes distincts sous-tendent ces deux fonctions. Par exemple, utiliser des stimuli variés [e.g., en variant l'orientation de l'objet présenté (haut/bas) ou en dégradant l'image elle-même tout en gardant la même tonalité spectrale que l'image de référence] ne modifie pas le temps de la détection ; en revanche cela rend la catégorisation beaucoup plus difficile. Par conséquent, la détection d'un objet ne semble pas impliquer nécessairement son identification. En effet si ces deux types de tâches étaient sous-tendus par les mêmes processus le fait de faire varier l'orientation des images ou la dégradation de celles-ci, devrait influencer de la même manière les deux types de tâches, ce qui n'est pas le cas (Mack et *al.*, 2008). Selon Fize et *al.* (2005) la catégorisation rapide de scènes naturelles impliquerait le gyrus cingulaire droit prêt du sulcus occipito-pariétal (aire de Brodmann 31), le gyrus fusiform gauche (aire de Brodmann 19/37), ainsi que le gyrus para-hippocampique et du gyrus occipital médian (aire de Brodmann 19) de manière bilatérale (Figure 16). Enfin, la catégorisation de scènes naturelles semble se faire principalement sur l'information globale de celles-ci, qui permet un accès direct et rapide aux contours des objets (Wichmann, Braun et Gegenfurtner, 2006). Cet effet de la préférence globale lors de la reconnaissance de scènes a été comme nous allons le voir mis en évidence en particulier dans des tâches utilisant des stimuli hiérarchisés (par exemple percevoir une grande lettre composée elle-même de petites lettres). Cependant dans cette étude la tâche demandée semble être de la détection plus que de la catégorisation tout comme celle utilisée par Peelen, Fei-Fei et Kastner, 2009. En effet, les auteurs (Wichmann, Braun et Gegenfurtner, 2006) ont utilisé une tâche de choix forcé spatial, dans laquelle les images sont présentées simultanément à droite et à gauche d'un point de fixation. Les participants doivent indiquer l'image qui contient un animal en appuyant sur le bouton droit ou gauche de la souris.

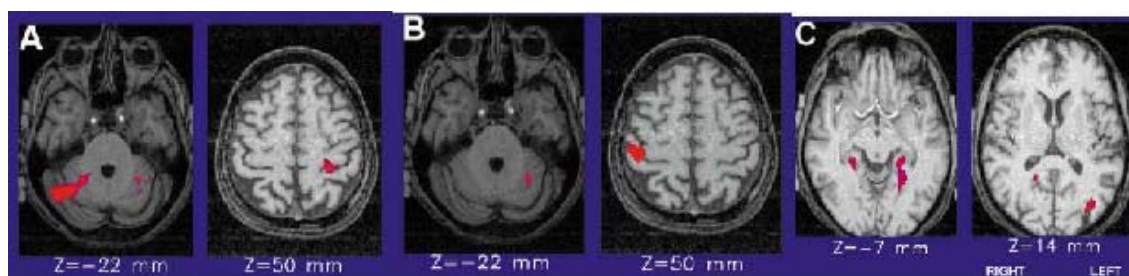


Figure 16 : Aires cérébrales impliquées dans la catégorisation rapide de scènes naturelles lors d'une étude menée en IRMf événementielle. Figure A illustre les données obtenues chez trois sujets droitiers et figure B chez trois sujets gauchers (afin de vérifier la robustesse du protocole). Pour le contraste : [cibles vs distracteurs] les activations observées se situent uniquement dans l'hémisphère controlatéral au niveau de la région de l'aire 4 de Brodmann et au niveau du cervelet ipsilatéral à la main dominante. La figure C présente les résultats obtenus chez les six sujets confondus. Un plus fort signal est présent pour le contraste [distracteurs vs cibles] au niveau du gyrus cingulaire droit près du sulcus occipito-pariétal (aire de Brodmann 31), et du gyrus fusiforme gauche (aire de Brodmann 19/37), ainsi qu'une activation bilatérale du gyrus para-hippocampique et du gyrus occipital médian (aire de Brodmann 19). (Figure tirée de Fize et *al.*, 2000).

2. Effet de la précedence globale dans le traitement de l'information

Les travaux de Navon (1977) utilisant des stimuli hiérarchiques, ont mis en avant la primauté du traitement des aspects globaux (identification d'une grande lettre formée de petites lettres) sur les aspects locaux (identification des petites lettres qui forment la grande lettre) (Figure 17). C'est le phénomène de « précedence globale » : le traitement global d'un stimulus est plus rapide que le traitement local de celui-ci. Par ailleurs, lorsque la grande lettre (globale) est différente des petites lettres (locales), les temps de réponse obtenus sont ralentis pour identifier les petites lettres, alors que les petites lettres différentes de la grande n'ont aucun effet sur les temps de réponse pour identifier la grande lettre (Cf. Figure 17 : effet congruence/non congruence). Cet effet est appelé interférence globale. Notons que l'effet de précedence globale est estompé lorsque les stimuli (hiérarchiques) sont filtrés passe-haut (sans les basses fréquences spatiales : BFS), supposant que les BFS portent l'information globale, et que les Hautes Fréquences Spatiales (HFS) portent l'information locale (Badcock, Whitworth, Badcock et Lovegrove, 1990). Il semble donc que le phénomène de précedence globale soit dû à une précedence temporelle du traitement des BFS.

Cet effet de précedence globale est interprété comme le reflet du principe fondamental d'analyse *coarse-to-fine*, c'est-à-dire d'une analyse partant du plus 'global' pour aller vers le plus 'local' au niveau des informations de l'image.

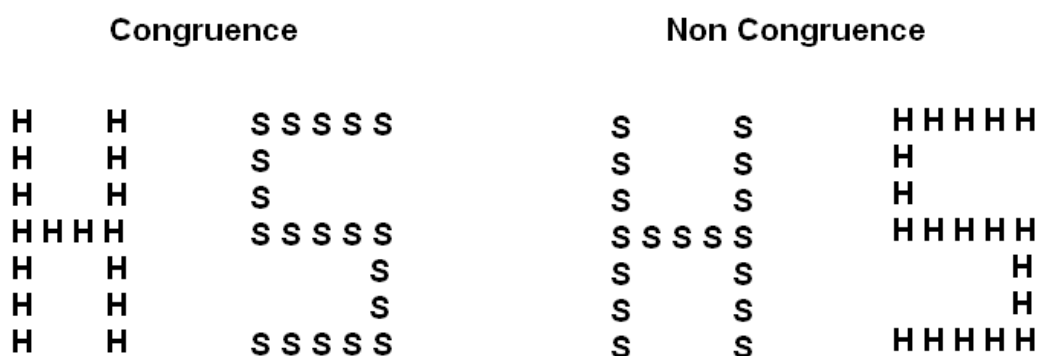


Figure 17 : Illustration de stimuli hiérarchiques utilisés par Navon (1977) : à gauche forme globale représentant la lettre H formée de petits H constituant la forme locale : stimuli congruents, et à droite : un grand H formé de petits S : le H est la forme globale et les S les formes locales : stimuli incongruents. (Figure tirée de Navon 1977).

3. Un principe de traitement *Coarse-to-Fine*

Hughes, Nozawa et Kitterle (1996) ont suggéré une relation étroite entre précedence globale et fréquences spatiales. En manipulant le contenu fréquentiel des images les études en psychophysiques ont pu appréhender le rôle des différentes fréquences spatiales dans l'analyse visuelle. L'analyse visuelle débute par l'extraction en parallèle, de différents attributs visuels à différentes échelles spatiales (Basole et *al.*, 2006), normalement divisées en Basses et Hautes Fréquences spatiales (BFS et HFS), respectant une certaine hiérarchie allant de l'information la plus grossière, la plus globale à l'information la plus fine, la plus détaillée. Ce traitement est appelé : traitement *coarse-to-fine* (Schyns et Oliva, 1994). Cette hypothèse repose, au niveau anatomo-fonctionnel, sur l'existence de deux voies visuelles. Tout d'abord la voie magno-cellulaire, composée de neurones à réponse phasique à « grands champs » récepteurs, spécialisée dans le traitement des Basses Fréquences Spatiales (BFS) donc de la forme globale de la scène comme nous l'avons évoqué précédemment. D'autre part, la voie parvocellulaire, composée de neurones à réponse tonique à petits champs récepteurs, spécialisée dans le traitement des moyennes et des Hautes Fréquences Spatiales (HFS), donc

des éléments locaux de la scène (Figure 18). Selon ce principe de traitement, l'information grossière issue des BFS, serait disponible avant l'information plus fine, véhiculée par les HFS (Marendaz, Rousset et Charnallet, 2003). En effet, le traitement des BFS par la voie magnocellulaire est plus rapide que le traitement des HFS par la voie parvocellulaire (Van Essen et de Yoe, 1995 ; Bullier, 2001). Selon les données issues de la psychophysique (Ginsburg 1986), de la neuroanatomie fonctionnelle des voies parvo et magnocellulaires (Van Essen et de Yoe, 1995) et de la catégorisation ultra rapide chez l'homme et le singe (Fabre-Thorpe et *al.*, 1998) on peut confirmer l'idée que, l'analyse visuelle débute avec une extraction en parallèle des différents attributs élémentaires, à différentes échelles ou fréquences spatiales, suivant le principe *coarse-to-fine* (Schyns et Oliva, 1994). Ainsi, l'extraction précoce des BFS fournirait un aperçu global de la structure spatiale de la scène et permettrait une première catégorisation perceptive. Cette même catégorisation va ensuite être affinée, validée ou infirmée par les informations issues des HFS, dont l'extraction est plus tardive (Ginsburg, 1986 ; Hugues et *al.*, 1996 ; Schyns et Oliva, 1994). Cette hypothèse de traitement *coarse-to-fine* pourrait expliquer la rapidité de reconnaissance des scènes et de leur catégorisation (Schyns et Oliva, 1994). D'autre part, les études en neuroanatomie ont mis en évidence que les BFS et HFS passeraient par deux voies différentes : magnocellulaire et parvocellulaire. Par conséquent on peut expliquer cette hiérarchie dans le traitement temporel, par la structure anatomique qui les sous-tend. Il a été montré que les informations transitent plus rapidement au niveau de la voie magnocellulaire par rapport à la voie parvocellulaire (Bullier, 2001). Si l'on considère la nature de l'information (globale vs locale) alors ce décalage temporel, entre les deux voies (magnocellulaire/ parvocellulaire) explique très bien le processus de traitement *coarse-to-fine* mis en jeu durant le traitement des fréquences spatiales (Schyns et Oliva, 1994). Les BFS sont transmises par la voie magnocellulaire qui permet d'accéder à l'information globale de la scène en reliant les structures sous-corticales : tel que les colliculi et le pulvinar à la voie dorsale, comprenant le cortex : pariétal (Berson, 1988), temporal (Sugase et *al.*, 1999) et frontal (Bullier, 2001). Cette analyse rapide et grossière va être ensuite affinée par le traitement des HFS véhiculées par la voie parvocellulaire qui se projette au niveau du cortex visuel primaire (V1) et de la voie ventrale (Merigan et Maunsell, 1993). Le principe de traitement *coarse-to-fine* des fréquences spatiales, a également été démontré, lors d'une tâche utilisant des scènes naturelles.

Schyns et Oliva (1994) ont utilisé une tâche d'appariement de stimuli « hybrides » formés de deux scènes naturelles appartenant à des catégories sémantiques différentes, superposées l'une sur l'autre, par exemple une scène d'autoroute en BFS sur une scène de ville en HFS. Ces auteurs ont montré que les présentations brèves de 30 millisecondes de ces stimuli, permettait un appariement basé sur les BFS, alors qu'une présentation plus longue de 150 millisecondes permettait un appariement basé sur les HFS. Ces résultats confirment que la reconnaissance de scènes se fait d'abord par un traitement des BFS puis des HFS.

En partant de l'hypothèse selon laquelle le traitement global/local et le traitement des BFS/HFS sont liés, de nombreux auteurs ont étudié la spécialisation hémisphérique du traitement des fréquences spatiales à l'aide du paradigme des formes hiérarchiques. Ils ont observé une spécialisation hémisphérique pour le traitement global/local, qu'ils ont interprété et généralisé, comme une spécialisation hémisphérique pour le traitement des HFS et des BFS avec l'hémisphère droit pour le traitement des BFS et l'hémisphère gauche pour les HFS.

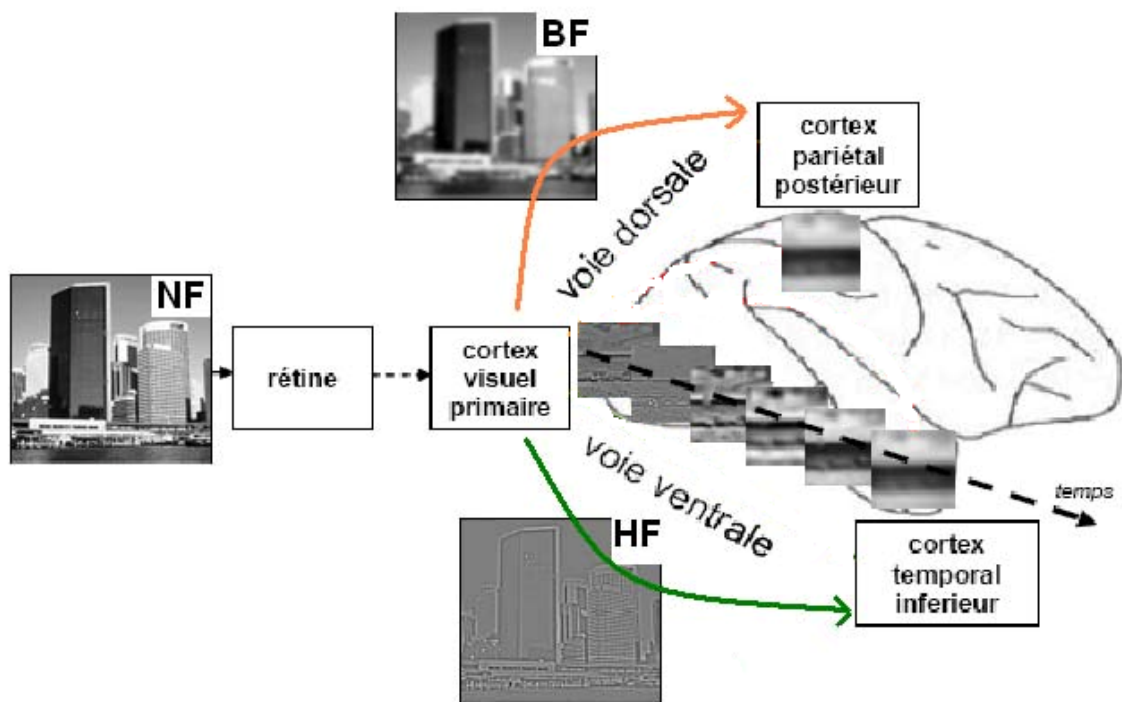


Figure 18 : Représentation du cheminement des fréquences spatiales. En orange est représentée la voie dorsale occipito-pariétale empruntée préférentiellement par les Basses Fréquences Spatiales (BFS), et en vert la voie ventrale occipito-temporale empruntée préférentiellement par les Hautes Fréquences Spatiales (HFS).

II. Spécialisation hémisphérique pour le traitement visuel des scènes naturelles

1. Asymétrie hémisphérique pour le traitement des Fréquences Spatiales contenues dans une scène naturelle

1.1. Définition et mise en évidence

Une spécialisation hémisphérique pour le traitement des Fréquences Spatiales (FS) a été observée (Kitterle, Christman, Hellige, 1990 ; Kitterle, Hellige, Christman, 1992) montrant une prépondérance de l'Hémisphère Droit (HD) (CV gauche) pour le traitement des BFS et une supériorité de l'Hémisphère Gauche (HG) (CV droit) pour le traitement des HFS.

Du fait du croisement partiel des voies visuelles jusqu'au cortex, les stimuli présentés dans le champ visuel gauche sont traités par l'HD et les stimuli présentés dans le CV droit sont traités par l'HG.

C'est sur la base d'une relation étroite entre l'information globale / locale et les basses / hautes fréquences spatiales, respectivement, que Sergent (1982) fut la première à proposer une asymétrie hémisphérique du traitement des fréquences spatiales. Elle a observé que, l'hémisphère droit serait plus efficace pour le traitement des BFS alors que l'hémisphère gauche traiterait plus efficacement les HFS. Chokron, Brickman, Wei et Buchsbaum (2000) ont testé l'hypothèse de l'asymétrie hémisphérique dans les processus de sélection d'information. Les résultats obtenus vont dans le même sens que ces derniers, ils indiquent que lorsque les petits stimuli entourés de distracteurs sont présentés dans le champ visuel droit, les sujets obtiennent des temps de réponse plus courts que lorsqu'ils sont présentés dans le champ visuel gauche, ce qui confirme un avantage de l'hémisphère gauche dans le traitement de l'information locale (Berlucchi, Aglioti et Tassinari, 1997). Kitterle, Christman et Hellige (1990), montrent également une asymétrie hémisphérique lors d'une tâche d'identification de fréquences spatiales. En utilisant non pas des formes hiérarchiques mais des réseaux, ils ont observé que les sujets étaient plus rapides pour identifier les réseaux en BFS lorsqu'ils étaient présentés dans le champ visuel gauche (traités par l'hémisphère droit) que dans le champ visuel droit (traités par l'hémisphère gauche) et les réseaux en HFS

lorsqu'ils étaient présentés dans le champ visuel droit (traités par l'hémisphère gauche) que dans le champ visuel gauche (traités par l'hémisphère droit).

Cependant ce phénomène d'asymétrie hémisphérique a été inféré plus que démontré, car en réalité ces études se sont servies de stimuli hiérarchiques en faisant le lien entre le traitement global/local et le traitement des BFS et des HFS, sans avoir manipulé les fréquences spatiales des stimuli. Ce couplage est pourtant loin d'être aussi univoque (Palmer, 1993). En effet, il est possible d'extraire l'information à la fois au niveau global et au niveau local sur une forme hiérarchique filtrée passe-haut (Oliva et Schyns, 1997). C'est pourquoi Peyrin, Chauvin, Chokron et Marendaz (2003), ont utilisé une tâche de catégorisation de scènes naturelles (et non des stimuli hiérarchiques), ce qui leur a permis de manipuler les fréquences spatiales de ces stimuli, afin d'étudier la rapidité du traitement des BFS et des HFS en fonction du champ visuel de présentation des scènes. Ces auteurs ont observé une spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales. En effet, les résultats de cette étude mettent en évidence une supériorité de l'hémisphère droit pour le traitement des BFS, et une supériorité de l'hémisphère gauche pour les HFS. Ils ont également pu conclure à l'aide de ces stimuli, à un effet de « précedence globale » comme c'était le cas pour les stimuli hiérarchiques. Par ailleurs, ils n'observent pas d'effet du type de scène (non-filtrée), ce résultat va dans le sens du modèle de Goldberg (cité par Peyrin et *al.*, 2003), selon lequel les scènes doivent être traitées de façon équivalente selon les deux hémisphères. C'est pourquoi Peyrin et *al.*, (2003) ont mené une étude (Figure 19) utilisant des scènes naturelles filtrées en BFS et en HFS, présentées en champs visuels latéralisés et central. En enregistrant le Temps de Réponse (TR) ils ont pu mettre en évidence cette spécialisation hémisphérique concernant les FS, mais cette fois à l'aide de stimuli complexes et écologiques (scènes naturelles). En effet les TR obtenus sont plus courts (approximativement 30 millisecondes) pour détecter les BFS dans le Champ Visuel (CV) gauche que dans le CV droit ainsi que pour détecter les HFS dans le CV droit que dans le CV gauche (Peyrin et *al.*, 2003). Peyrin et *al.* (2003) en manipulant les FS d'images de scènes naturelles ont mis en évidence cette spécialisation hémisphérique chez des participants sains lors d'une tâche de catégorisation de scènes. Peyrin et *al.* (2003 et 2004) ont alors montré que l'Hémisphère Droit (HD) traitait préférentiellement les BFS et que l'Hémisphère Gauche (HG) traitait préférentiellement les HFS.

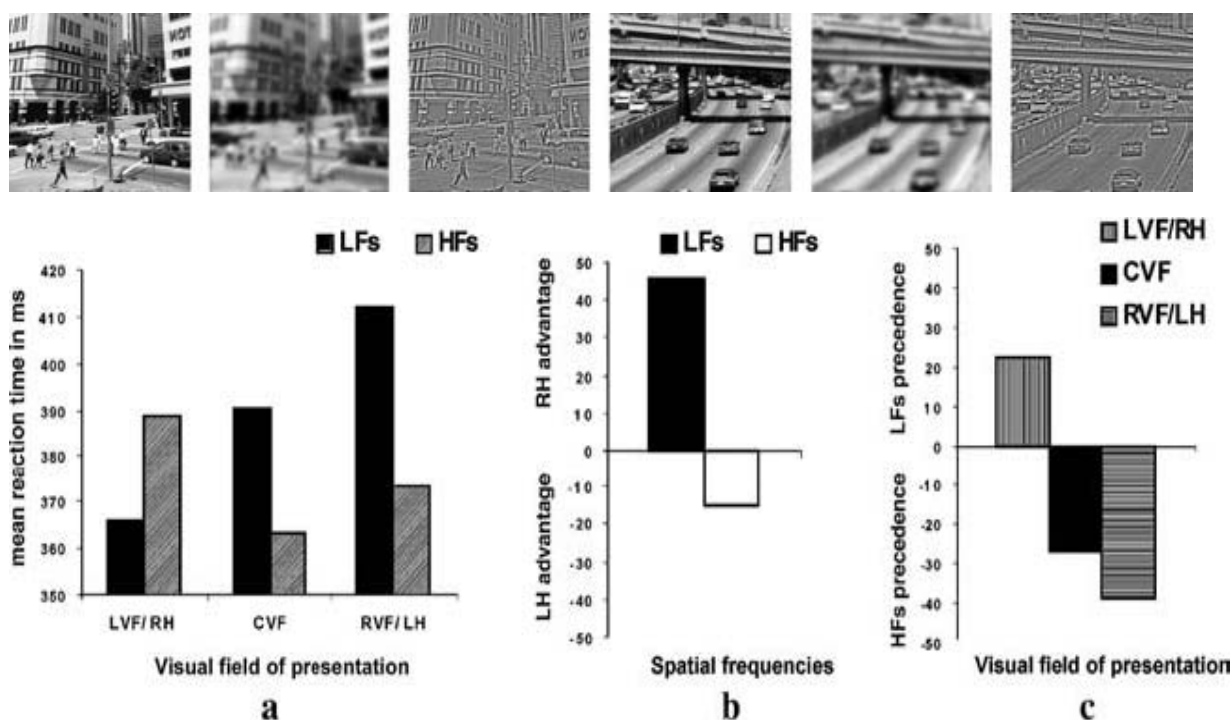


Figure 19 : Haut : (de gauche à droite) images de scène naturelle de ville non filtrée, puis filtrée en basses fréquences spatiales, et en hautes fréquences spatiales, puis image de scène naturelle d'autoroute non filtrée, puis filtrée en basses fréquences spatiales, et en hautes fréquences spatiales. Bas : performances obtenues en fonction du champ visuel de présentation et des fréquences spatiales mettant en évidence une prépondérance de l'HD (CV gauche) pour le traitement des BFS et une supériorité de l'HG (CV droit) pour le traitement des HFS. (Figure tirée de Peyrin et *al.*, 2003).

Cette spécialisation hémisphérique a été observée au sein d'aires corticales de haut niveau mais également de bas niveau (e.g., Idaka et *al.*, 2004 ; Peyrin et *al.*, 2004), en effet certains auteurs ont montré (Peyrin et *al.*, 2004) à l'aide d'une étude en imagerie fonctionnelle que cette spécialisation pour le traitement des FS existerait au sein d'aires visuelles primaires tel que le gyrus occipital médian (*Cf* partie 1.2. suivante). Cependant cette asymétrie hémisphérique est moins, voir plus du tout présente lors de tâche de bas niveau (tâche de détection) (Grabowska et Nowicka, 1996), et disparaît également selon les contraintes temporelles de la tâche (temps de présentation des images) (Peyrin et *al.*, 2006b). Cette asymétrie a été observée pour des images de scènes naturelles filtrées (en BFS et en HFS) (Peyrin et *al.*, 2003, 2004). Cependant il semble que cette asymétrie soit sensible à plusieurs facteurs comme par exemple la consigne durant la tâche (Oliva et Schyns, 1997) ou le temps

de présentation des images (Peyrin et *al.*, 2006a). En effet, au stade de traitement très perceptif il y aurait une supériorité de l'hémisphère droit pour l'ensemble des fréquences spatiales, alors qu'à un stade plus tardif, on observerait une supériorité de l'hémisphère gauche pour les HFS et une supériorité de l'hémisphère droit pour les BFS. Selon cette théorie, l'asymétrie hémisphérique est davantage conçue comme un système dynamique. Une étude récente s'inscrivant dans cette approche dynamique du traitement de l'information visuelle (Peyrin, Mermillod, Chokron et Marendaz, 2006b), permet de mettre en évidence un pattern de spécialisation hémisphérique à l'intérieur duquel la supériorité d'un hémisphère sur l'autre pourrait varier en fonction des contraintes temporelles (du temps d'apparition de l'image à l'écran). Ainsi, plus il y a de contraintes temporelles plus la spécialisation de chaque hémisphère est marquée. En effet, ces auteurs observent une prépondérance de l'hémisphère droit à la fois pour les hautes et les basses fréquences spatiales, lorsque le temps de présentation de la scène est de 150 millisecondes. En revanche, lorsque le temps de présentation est de 30 millisecondes, ils remarquent une spécialisation hémisphérique (comme observé par les auteurs précédemment cités : les BFS sont mieux traitées dans le champ visuel gauche (hémisphère droit) que dans le champ visuel droit (hémisphère gauche) et réciproquement pour les HFS). De plus des études reportent un avantage du traitement des stimuli présentés dans le champ visuel gauche, c'est-à-dire lorsqu'ils sont majoritairement traités par l'HD, et ce quelle que soit la fréquence spatiale à traiter. Ceci met en évidence une dominance de l'hémisphère droit dans le traitement visuel (Kitterle et *al.*, 1990 ; Peyrin et *al.*, 2006b). L'hémisphère droit semble plus réceptif à tous les types de fréquences spatiales (Rebaï et *al.*, 1998 ; Grabowska et *al.*, 1992), suggérant que les deux hémisphères ne traitent pas les informations visuelles de manière identique. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'HD est en général plus spécialisé et ainsi plus sollicité pour le traitement visuo-spatial et plus précisément pour l'attention visuelle que l'hémisphère gauche. En effet, il est admis dans la littérature que chaque hémisphère est responsable de l'orientation de l'attention dans l'hemi-espace controlatéral, mais l'HD présente la particularité d'avoir la capacité à orienter son attention dans les deux hémis-espace, c'est-à-dire non seulement dans l'hemi-espace gauche mais également dans l'hemi-espace droit pourtant ipsilatéral (Heilman et Van den Abell, 1980).

1.2. Mise en évidence à l'aide de données issues de la neuropsychologie et de la neuro-imagerie

Les études menées en neuropsychologie et en neuro-imagerie ont permis de faire des corrélats anatomo-fonctionnels et de mieux connaître les structures corticales impliquées lors de cette spécialisation hémisphérique, et notamment lors du traitement visuel de l'information globale/locale. Delis, Robertson et Efron (1986) ont remarqué que les patients ayant une lésion au niveau de l'hémisphère gauche ne perçoivent pas la forme locale, tandis que les patients présentant une lésion de l'hémisphère droit ne perçoivent plus alors la forme globale de stimuli visuels (Figure 20), ceci se vérifiait à la fois lors de la production et de la reconnaissance de formes complexes hiérarchiques. Cette double dissociation a permis de conclure à un rôle différent de chaque hémisphère lors du traitement de l'information globale/locale. Par la suite Lamb et *al.* (1990) ont mis en évidence qu'une région bien spécifique était responsable de ces troubles du traitement de l'information globale ou locale, au sein de chaque hémisphère. Il a observé que les patients souffrant d'une lésion du gyrus temporal supérieur droit présentaient des difficultés pour la reconnaissance de la forme globale, et que les patients souffrant d'une lésion du gyrus temporal supérieur gauche présentaient des difficultés pour la reconnaissance des formes locales.

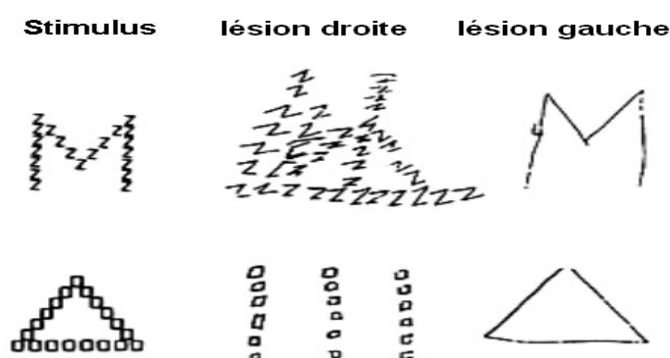


Figure 20 : Copie de stimuli hiérarchiques par des patients souffrant d'une lésion hémisphérique unilatérale droite ou gauche. A gauche les stimuli à recopier par les patients. Les productions des patients souffrant d'une lésion hémisphérique droite mettent en évidence une restitution correcte de la forme locale, mais pas de la forme globale (au milieu), alors que les productions de patients souffrant d'une lésion hémisphérique gauche mettent en évidence une restitution correcte de la forme globale mais pas de la forme locale (à droite) (Figures tirées de Delis et *al.*, 1986).

A l'aide de l'imagerie fonctionnelle cérébrale, d'autres études ont été menées toujours dans la même optique : d'une localisation anatomo-fonctionnelle et ont apporté des éléments supplémentaires en faveur de cette hypothèse de spécialisation hémisphérique pour le traitement visuel de l'information globale/locale. Pour cela, ils ont utilisé des tâches de reconnaissances visuelles de stimuli hiérarchiques afin d'observer si le traitement de l'information globale ou locale de ceux-ci induisait une activation cérébrale différente.

Fink et *al.* (1996) ont réalisé l'étude princeps dans ce domaine, chez des sujets sains. Ils ont utilisé la TEP (tomographie par émission de positons) afin de mesurer l'activité cérébrale lors d'une tâche de reconnaissance de lettres avec des stimuli hiérarchiques. La tâche proposée aux participants contrôles était une tâche d'attention dirigée, qui consistait à l'identification des lettres présentées, soit au niveau local soit global. Ils ont observé une activation du gyrus lingual droit (aire de Brodmann, AB 18) lors du traitement global de la lettre (attention dirigée sur la grande lettre) et une activation du cortex occipital inférieur gauche (AB 18) pour le traitement local (attention dirigée sur les petites lettres formant la grande lettre) (Figure 21). Le résultat crucial apporté par les travaux de Fink et *al.* (1996) est que la spécialisation hémisphérique se ferait à un niveau cortical très bas. Un peu plus tard, Martinez et *al.* (1997) ont confirmé ce résultat, à l'aide d'une étude en IRMf (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle) ils ont montré l'implication de la région occipito-temporale (AB 19/37) sous-tendant la spécialisation hémisphérique. Puis, Han et *al.* (2002) ont montré une spécialisation hémisphérique (pour le traitement de lettres hiérarchiques) dès le cortex occipital.

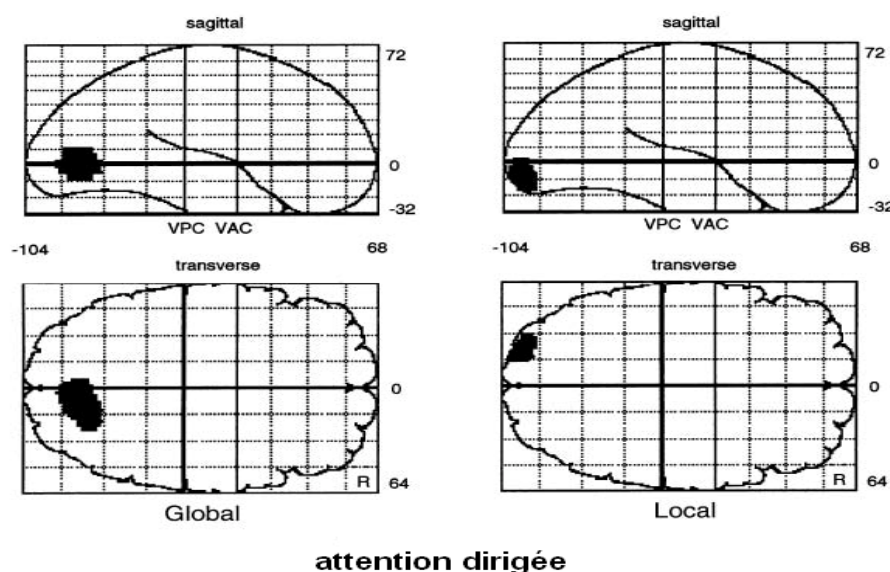


Figure 21 : Activations observées au cours d'une tâche d'attention dirigée utilisant des formes hiérarchiques. Figures de gauche : activation du gyrus lingual droit pour diriger l'attention au niveau global et figures de droite : activation du cortex occipital inférieur gauche pour orienter l'attention au niveau local. (Figure tirée de Fink et *al.*, 1996).

1.3. Spécialisation hémisphérique des aires postérieures dans le traitement des Fréquences Spatiales

Robertson, Lamb et Knight (1988) ont montré que l'asymétrie hémisphérique pour le traitement de l'information globale/locale serait due à un mécanisme perceptif, localisé dans la région temporo-pariétale. En utilisant un paradigme de formes hiérarchiques (Figure 22, gauche), ils montrent en effet qu'une lésion dans la région temporo-pariétale droite perturbe l'identification des cibles globales, alors qu'une lésion dans la région temporo-pariétale gauche perturbe l'identification des cibles locales, relativement à des sujets normaux.

Retrouve-t-on une asymétrie hémisphérique du traitement des fréquences spatiales au niveau du cortex visuel primaire ?

Comme cités précédemment les travaux de Fink, Halligan, Marshall, Frith, Frackowiak et Dolan (1996) ainsi que ceux de Han, Weaver, Murray, Kang, Yund et Woods, (2002) ont mis en exergue, dans des conditions expérimentales relativement similaires, une spécialisation hémisphérique dès le cortex occipital (Figure 22, droite).

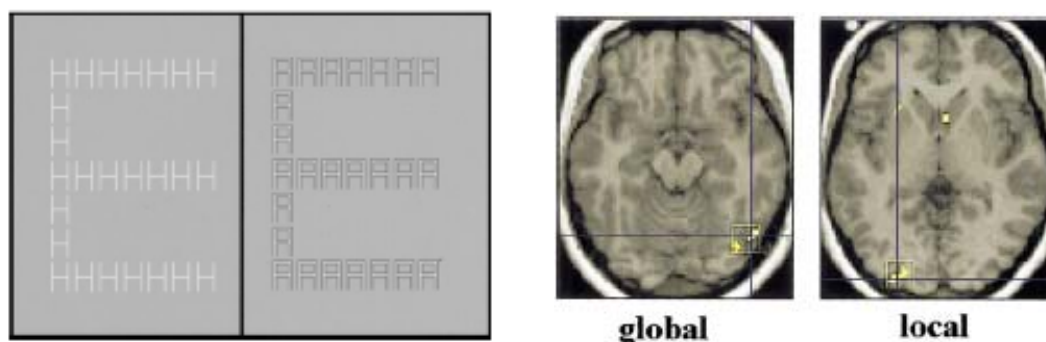


Figure 22 : (A droite) Stimuli hiérarchiques utilisés par Han et *al.*, 2002. A gauche, le contenu en fréquences spatiales n'a pas été manipulé : lettre E (stimulus global) formée de petits H (stimulus local). A droite, lettre E formée de petits A, mais contrastés. (A gauche) Localisation des régions d'intérêts (ROI) dans la condition globale, à gauche, avec une activation postérieure droite et à droite activation postérieure gauche pour la condition locale [$P < 0.01$ (non corrigé)]. L'interaction significative entre le niveau hiérarchique d'attention dirigée et les hémisphères confirme la spécialisation hémisphérique du cortex occipital (Figures tirées de Han et *al.*, 2002).

Toutes ces études en IRMf ont utilisé des stimuli hiérarchiques, cependant aucune n'a réellement filtré les stimuli en fréquences spatiales. Il semble intéressant de connaître les régions corticales qui permettent ce traitement des différentes fréquences spatiales en utilisant cette fois des stimuli écologiques permettant ces filtrages, chez des sujets sains afin d'estimer l'implication des aires postérieures dans ce type de traitement. C'est pourquoi des études ont tenté de localiser à l'aide de scènes naturelles (Figure 23), les régions cérébrales impliquées dans la spécialisation hémisphérique lors d'une tâche sous IRMf (Peyrin, Baciù, Segebarth et Marendaz, 2004 ; Peyrin, Schwartz, Seghier, Michel, Landis et Vuilleumier, 2005 ; Peyrin et *al.*, 2006). Les résultats ont mis en évidence une spécialisation hémisphérique fonctionnelle au niveau de la jonction occipito-temporale. Cette région est essentiellement activée dans l'hémisphère droit pour le traitement des BFS, et dans l'hémisphère gauche pour le traitement des HFS.

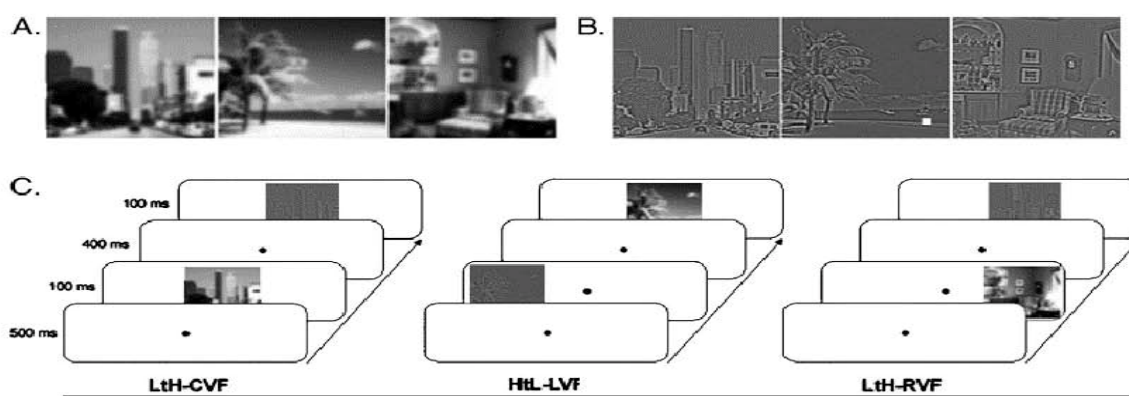


Figure 23 : Exemple d'images de scènes utilisées dans l'expérience. Chaque image (que ce soit les villes, les plages ou les intérieurs) est filtrée en (A) basses fréquences spatiales (BFS, < 4 cycles/degrés) et (B) hautes fréquences spatiales (HFS, > 6 cycles/degrés). (C) chaque essai est composé de la présentation de 2 scènes successives présentées soit en basses et hautes fréquences [LtH] (*coarse-to-fine*) soit en hautes et basses fréquences [HtL] (*fine-to-coarse*). La première image de chaque session est présentée en champ visuel central (CVc) figures de gauche, puis la présentation des images à l'intérieur des deux sessions est pseudo-aléatoire, dans le champ visuel gauche [CVg] ou dans le champ visuel droit [CVd]. (Figures tirées de Peyrin et al., 2005).

Cette spécialisation hémisphérique apparaîtrait très tôt dans le traitement de l'information visuelle, et ce dès le cortex occipital (Figure 24). Plus tard Peyrin et al., 2006, ont mené une étude mêlant une approche lésionnelle : neuropsychologique, ainsi que l'IRMf en utilisant les mêmes stimuli de scènes naturelles filtrées en fréquences spatiales (BFS et HFS) (Figure 25). Ils ont proposé cette tâche de reconnaissance de scènes naturelles à une patiente ayant subi une embolisation d'une MAV (Malformation Artério-Veineuse). La MAV était localisée au niveau du cortex visuel primaire (V1) de l'hémisphère droit. Afin d'évaluer les performances de la patiente lors de la détection de scènes filtrées en HFS ou en BFS ils ont présenté des scènes filtrées ou non dans le champ visuel sain ipsilésionnel. Ainsi, ils ont pu évaluer le rôle du cortex visuel droit à la fois pour l'analyse visuelle fine (locale/hautes fréquences spatiales) et globale (BFS). Cette étude s'est déroulée en deux temps : une phase pré-chirurgicale, une semaine avant l'intervention et une phase post-chirurgicale, six mois après. Les résultats confirment qu'une lésion au niveau du cortex visuel primaire droit (V1) provoque une diminution des performances obtenues dans le champ visuel ipsilésionnel. De plus, cette patiente présentait avant l'intervention des performances plus faibles que les participants contrôles ceci à la fois pour la précision des réponses mais aussi pour les temps de réaction obtenus dans le champ visuel droit sain.

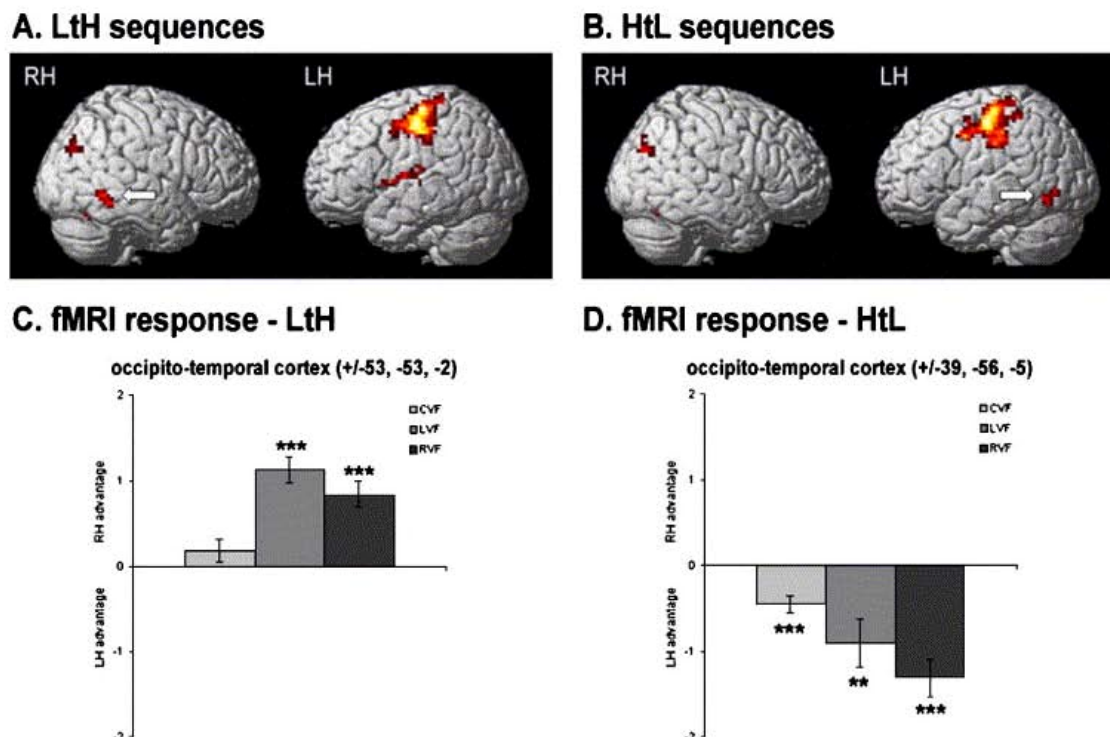


Figure 24 : Activations cérébrales mettant en évidence l'asymétrie hémisphérique au niveau du cortex occipito-temporal. A) le contraste d'analyse présenté est BFS vs HFS, mettant en évidence une activation au sein du cortex moteur gauche, des régions occipito-pariétale et temporales inférieures droites qui sont plus activées que les aires homologues dans l'hémisphère gauche. B) le contraste d'analyse présenté est HFS vs BFS, mettant en évidence une activation au sein du cortex moteur gauche et des régions occipito-pariétales droite et les régions occipito-temporales gauche montrent une activation importante pour cette condition. Même si certaines régions sont plus activées au niveau de l'hémisphère gauche ou droit, à la fois pour les BFS et pour les HFS (n'allant à première vue, pas dans le sens d'une spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales), certaines régions sont activées de manière très différente selon les fréquences spatiales à traiter et notamment le cortex occipito-temporal. C) activité au niveau du cortex occipito-temporal droit, mettant en évidence une activation plus marquée pour les BFS vs HFS. D) activité au niveau du cortex occipito-temporal gauche, mettant en évidence une activation plus marquée pour les HFS vs BFS. (Figures tirées de Peyrin et al. (2005).

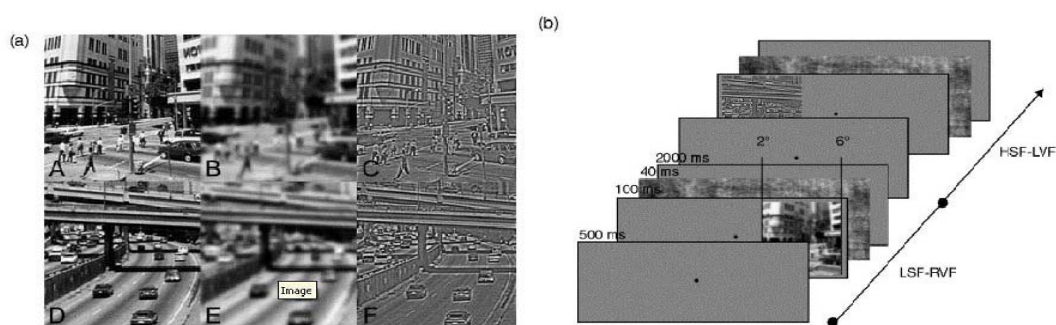


Figure 25 : (a) Stimuli utilisés par Peyrin et *al.*, 2006 lors de la tâche de reconnaissance de scènes : non filtrées à gauche en différents niveaux de gris (ville images du haut / autoroute images du bas) (A+D), filtrée en basses fréquences spatiales (BFS) (B+E) et filtrée hautes fréquences spatiales (HFS) (C+F). (b) exemple d'un essai avec des images filtrées soit en HFS soit en BFS, présentées en champ gauche (hémisphère droit) soit en champ visuel droit (hémisphère gauche). (Figures tirées de Peyrin et *al.*, 2006).

A la suite de l'opération cette patiente, présentait un déficit supplémentaire concernant le traitement des BFS (par rapport aux contrôles) confirmant le rôle de l'HD dans le traitement des BFS (Figure 25 bis). Ces résultats vont dans le sens des études précédemment décrites (Robertson et *al.*, 1988, Fink et *al.*, 1996 ; Han et *al.*, 2002 ; Peyrin et *al.*, 2004 ; Peyrin et *al.*, 2005 ; Peyrin et *al.*, 2006) selon lesquelles la région occipito-temporale droite traiterait préférentiellement les BFS. Dans la même étude, Peyrin et *al.* (2006) avaient proposé ce même protocole de reconnaissance de scènes naturelles de ville et d'autoroute, présentées en champ visuel : central, gauche ou droit, et filtrées en BFS ou HFS, à un groupe d'hommes ainsi qu'à un groupe de femme contrôles. Ils ont alors observé lors de cette tâche, une moins grande spécialisation hémisphérique pour les performances obtenues par le groupe de femmes. On peut alors, se poser la question de l'effet du sexe sur les performances obtenues pour ce type d'expérience avant même de se poser la question chez les patients souffrant d'une lésion occipitale droite ou gauche comme nous le ferons lors de la PARTIE 2 (études 2 et 3). Comme nous allons l'aborder à présent, des études menées sur la spécialisation hémisphérique ont suggéré un effet du sexe et de l'âge sur le pattern de latéralisation fonctionnelle (Mann, Hazlett, Byne, Hof, Buchsbaum, Cohen, Goldstein, Haznedar, Mitsis, Siever, Chu, 2011).

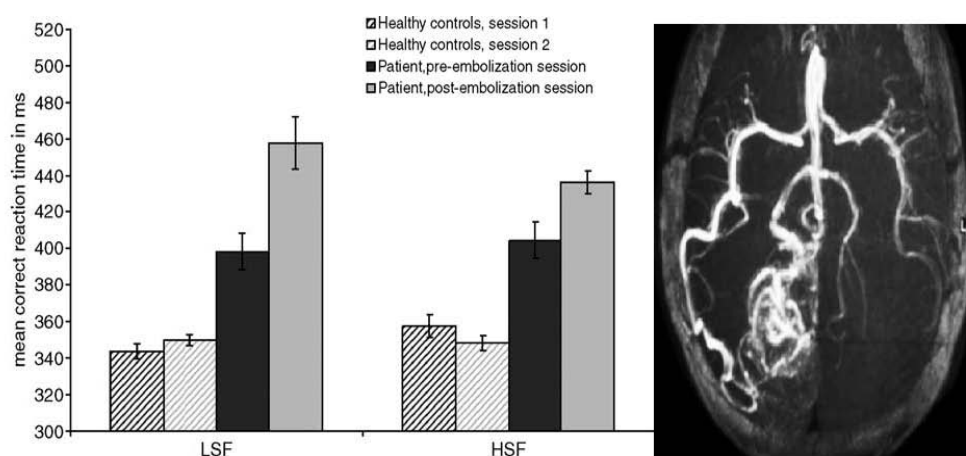


Figure 25 bis : Effet d’une lésion occipitale droite sur la reconnaissance de scènes. Etude pré et post-opératoire. Figure de gauche : graphique présentant le temps de réponse en millisecondes pour détecter la cible (en HFS ou en BFS) pour la patiente et pour le groupe de contrôle : constitué de femmes saines. Figure de droite : angiographie mettant en évidence une malformation artérioveineuse occipito-temporo-pariétale droite (image présentée avec les conventions radiologiques : la droite est à gauche et la gauche à droite). (Figures tirées de Peyrin *et al.*, 2006).

1.4. Effet du sexe et du vieillissement sur la spécialisation hémisphérique

1.4.1. Effet du sexe sur la spécialisation hémisphérique

Selon certains auteurs, la spécialisation hémisphérique dépendrait également du sexe des participants (homme vs femme). Les hommes seraient plus latéralisés que les femmes concernant le pattern d’activation cérébrale (Kolb et Wishaw, 1996), et les femmes présenteraient un traitement plus symétrique pour l’information globale-locale, que les hommes. Il faut préciser que ces hypothèses sont tirées d’une expérience réalisée chez l’enfant, (Kramer, Ellenberg, Leonard et Share, 1996). C’est pourquoi Roalf, Lowery et Turetsky, (2006) ont étudié l’effet du sexe sur la latéralisation hémisphérique à l’aide d’une étude en électrophysiologie (plus précisément en électro-encéphalographie) chez des adultes. Ils ont observé que les femmes traitent plus rapidement l’information « locale », alors que les hommes ne présentent pas de différence pour traiter les stimuli hiérarchiques. Ils ont démontré

que les femmes étaient moins latéralisées que les hommes dans les tâches visuo-spatiales (Roalf et al., 2006). De même que Lee, Chung, Chang, Kim, Park, Ryu et Jeong (2012) ont observé avec la même technique une différence au niveau de la jonction temporo-pariétale droite entre les hommes et les femmes durant une tâche d'identification de lettre (Tâche de Navon décrite plus haut). Ceci peut s'expliquer probablement par le fait que les femmes subissent un effet hormonal sur leur spécialisation hémisphérique. En effet, chez la femme les fluctuations du niveau d'hormones durant le cycle menstruel affecte l'asymétrie hémisphérique, qui se traduirait par un partage entre les deux hémisphères de l'activation neuronale (Hausmann, 2005), c'est-à-dire une plus grande bilatéralisation. Bourne (2005) a également démontré à l'aide d'une tâche utilisant des visages « hybrides » que les femmes sont moins latéralisées que les hommes. De plus, Peyrin et al. (2006) ont mis en évidence à l'aide d'une tâche de reconnaissance de scènes (décrite précédemment) que les hommes présentent de meilleures performances pour traiter les BFS présentées dans le champ visuel gauche (impliquant l'HD) et les HFS présentées dans le champ visuel droit (impliquant l'HG) allant dans le sens de la spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales alors que les femmes ne présentent pas de profil allant dans ce sens (les performances obtenues par les femmes ne sont pas différentes selon le champ visuel de présentation et selon les fréquences spatiales des scènes) (Figure 26).

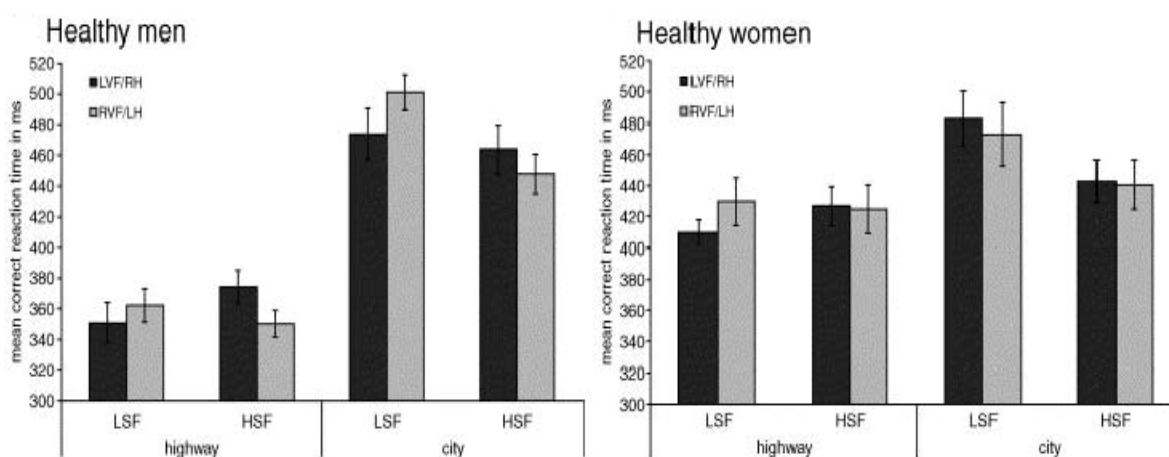


Figure 26 : Illustration des performances obtenues par le groupe d'hommes à gauche et le groupe de femmes à droite, pour les différentes scènes : ville (*city*) et autoroute (*highway*), selon le champ visuel de présentation (LVF/RH : champ visuel gauche/hémisphère droit et RVF/LH : champ visuel droit/hémisphère gauche) et selon les fréquences spatiales des scènes (LSF : basses ; HSF hautes fréquences spatiales). (Figures tirées de Peyrin et al., 2006).

1.4.2. Effet du vieillissement sur la spécialisation hémisphérique

Certains travaux suggèrent qu'avec l'avancée dans l'âge, la sollicitation des deux hémisphères serait différente pour une même tâche. Une étude (Greenwald et Jerger, 2001) de potentiels évoqués a montré qu'une onde (la N200) chez les sujets âgés est beaucoup moins ample que celle de sujets jeunes, mais beaucoup plus étalée sur le scalp. Cela peut signifier que l'activité des neurones est redistribuée chez les sujets âgés, soit le nombre de neurones activés est différent, soit leur efficacité avec l'âge n'est plus équivalente. Ainsi, pour faire la même tâche (au niveau comportemental), cela demande une activation plus importante de neurones sur des régions plus étendues, mais cela ne veut pas dire qu'il y a perte neuronale. Dans cette étude, les résultats suggèrent que l'âge a un effet sur l'asymétrie hémisphérique. D'autre part, certains auteurs (Cabeza, 2002 ; Dolcos, Rice et Cabeza, 2002) ont proposé un modèle pour expliquer l'effet de l'âge sur l'activité cérébrale durant une performance cognitive. Ce modèle, appelé HAROLD (*hemispheric asymmetry reduction in older adults*), propose que dans des circonstances comparables, l'activité préfrontale durant des performances cognitives tend à être moins latéralisée chez les sujets âgés que chez les sujets jeunes (Figure 27). Ce résultat suggère que l'asymétrie hémisphérique s'atténuerait avec l'âge. Par ailleurs, Dolcos *et al.* (2002) émettent l'hypothèse selon laquelle l'effet de l'âge serait plus important sur l'hémisphère droit puisqu'il montre un déclin plus important que l'hémisphère gauche. Cabeza, Anderson, Locantore et McIntosh, (2002) en utilisant la TEP et l'IRMf, ils observent que l'activité du cortex préfrontal tend à être moins asymétrique chez les sujets âgés (HAROLD). En effet, les sujets âgés montreraient une activation du cortex préfrontal plus bilatérale que les sujets jeunes lors d'une tâche d'attention visuelle. D'autre part, ils feraient preuve d'une activité occipitale moins importante que les jeunes, mais d'une activité préfrontale et pariétale plus importante, ce qui pourrait refléter la mise en place d'une compensation (Cabeza, Daselaar, Dolcos, Prince, Budde et Nyberg, 2004). Ils proposent deux hypothèses pour expliquer ce phénomène. La première hypothèse met en avant un rôle compensatoire, les sujets âgés puiseraient dans l'autre hémisphère l'activité nécessaire qui n'est plus fournie, pour maintenir de bonnes performances comportementales et ainsi, compenser le déficit de l'hémisphère droit. La seconde hypothèse est l'hypothèse de différenciation, selon laquelle le processus du vieillissement évoluerait en miroir avec le processus du développement.

La dédifférenciation serait l'inverse de la différenciation au cours du développement, en d'autres termes la réduction de l'asymétrie hémisphérique au cours du vieillissement pourrait refléter une difficulté à mobiliser des mécanismes neuronaux spécialisés. Ces auteurs observent que les sujets âgés activent les deux hémisphères pour compenser, ce qui leur permet d'obtenir des performances équivalentes de celles obtenues par les sujets jeunes. Ces études confirment un effet de l'âge sur l'asymétrie hémisphérique chez des sujets âgés normaux. C'est pourquoi dans l'étude 1, nous avons choisi d'étudier la spécialisation hémisphérique chez des sujets sains, en tenant compte de l'effet éventuel de l'âge et du sexe des participants.

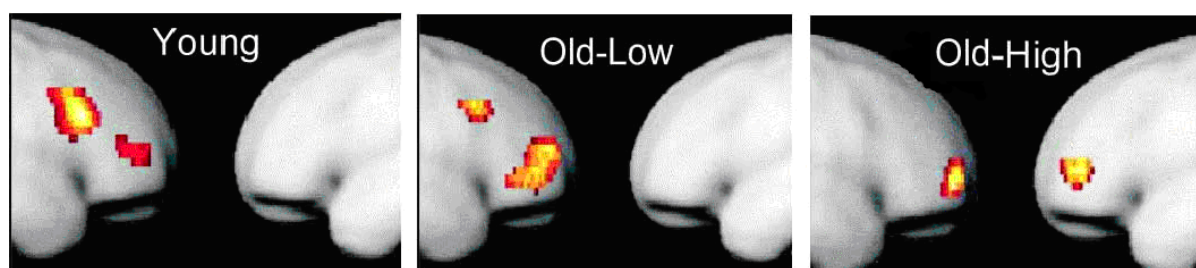


Figure 27 : Effet de l'asymétrie hémisphérique et de l'âge : activation illustrant la compensation du cortex préfrontal mise en évidence par le modèle HAROLD. Lors d'une tâche mnésique, les activations obtenues par les participants « moins performants » (old-low) [image au centre] ne montrent pas de réduction de la latéralisation, alors que les participants « forts » (old-high) [image de droite] montrent un pattern d'activation bilatérale, [l'image de gauche] « young » représente l'activation obtenue chez les sujets jeunes qui constitue l'activation de référence. (Figure tirée de Dolcos et *al.*, 2002).

Résumé

La reconnaissance visuelle est extrêmement rapide chez l'être humain. Elle respecte une certaine hiérarchie de traitement. Les travaux de Navon (1977), ont mis en avant la primauté du traitement des aspects globaux sur les aspects locaux contenus dans l'information visuelle. L'effet de précedence globale est estompé lorsque les stimuli (hiérarchiques) sont filtrés passe-haut (sans les basses fréquences spatiales), suggérant alors que les BFS portent l'information globale, et que les Hautes Fréquences Spatiales (HFS) portent l'information locale. Il semble donc que le phénomène de précedence globale soit dû à une précedence temporelle du traitement des BFS. Cet effet de précedence globale est interprété comme le reflet du principe fondamental d'analyse *coarse-to-fine*, c'est-à-dire d'une analyse des informations de l'image, du plus 'global' pour aller vers le plus 'local'. Selon ce principe de traitement, l'information grossière issue des BFS, serait disponible avant l'information plus fine, véhiculée par les HFS. Certains auteurs ont mis en évidence une implication différente de chaque hémisphère pour le traitement de l'information visuelle. En effet, l'hémisphère droit serait plus efficace pour le traitement des BFS alors que l'hémisphère gauche traiterait plus efficacement les HFS. De plus, les études menées en neuropsychologie et en neuro-imagerie ont permis de confirmer cette hypothèse de spécialisation hémisphérique. Il a été démontré que les patients ayant une lésion au niveau de l'hémisphère gauche ne perçoivent pas la forme locale, tandis que les patients présentant une lésion de l'hémisphère droit ne perçoivent plus la forme globale des stimuli visuels. Cette spécialisation hémisphérique (pour le traitement de lettres hiérarchiques) prendrait naissance dès le cortex occipital. Deux facteurs peuvent moduler cette spécialisation hémisphérique : le sexe (celle-ci serait plus marquée chez les hommes) et l'âge (elle serait plus marquée chez les participants jeunes).

Dans le chapitre suivant nous définissons l'Hémianopsie Latérale Homonyme avant de présenter les études ayant visé à utiliser ce trouble comme un modèle pathologique de la cognition visuelle.

CHAPITRE 3 : L'HEMIANOPSIE LATERALE HOMONYME COMME MODELE PATHOLOGIQUE DU TRAITEMENT VISUEL

I. L'hémianopsie latérale homonyme (HLH)

1. Définition

Avant de définir l'hémianopsie latérale homonyme, qui est une forme d'amputation du champ visuel, il semble nécessaire de rappeler c'est qu'est le champ visuel. « *Le champ visuel est l'ensemble des points de l'espace qu'un œil immobile peut embrasser* » (chapitre premier, Le Champ Visuel, Topographie normale et pathologique de ses sensibilités, Dubois-Poulsen, 1952) (Figure 28).

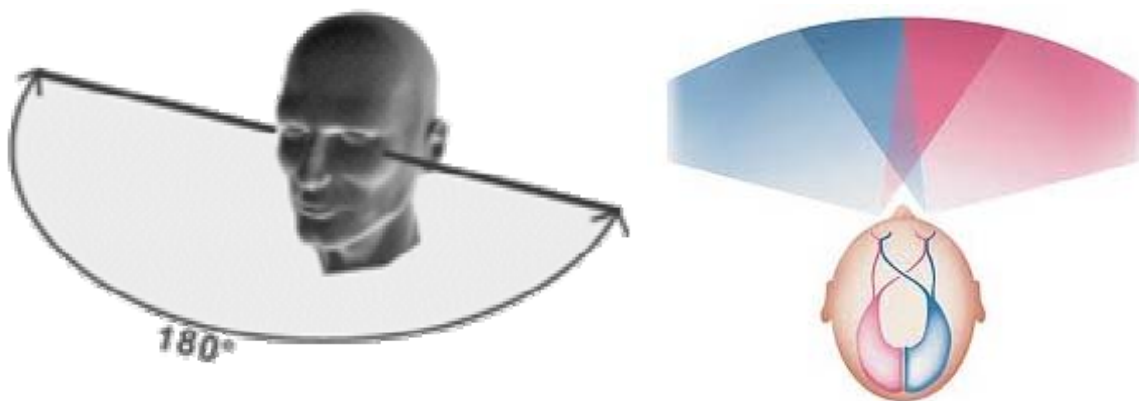


Figure 28 : Représentation du champ visuel perçu lorsque les deux yeux sont ouverts. (Tiré de http://ophtasurf.free.fr/vue/champ_visuel.htm)

L'exploration du champ visuel a, semble-t-il, commencé avec les Grecs. La plus ancienne description d'hémianopsie remonte à Hippocrate, 5 siècles avant Jésus-Christ. Cependant, Von Graefe (vers 1856) peut être considéré comme le père de la campimétrie. Il se servait d'un tableau noir face au malade, et, en déplaçant une boule blanche à l'extrémité d'un manche noirci, notait sur le tableau l'endroit où la boule apparaissait ou disparaissait du champ visuel du patient. Il créa alors une séméiologie en s'appuyant sur sa pratique, en décrivant le rétrécissement concentrique, l'élargissement de la tâche aveugle, le scotome central, en distinguant hémianopsie homonyme et hétéronyme. Au début du XX^{ème} siècle l'évaluation du champ visuel s'est développée avec l'intérêt de la standardiser, la notion d'isoptère est alors introduite (Figure 29).

On appelle champ visuel la totalité de l'espace du monde extérieur fournie aux deux yeux sans mouvement de la tête. La qualité de la vision n'est pas uniforme au sein du champ visuel. La densité des photorécepteurs (en particulier des cônes) diminue de la fovéa vers la périphérie et la sensibilité du champ visuel diminue proportionnellement. Le champ visuel correspond à la partie de l'espace perçue par un œil immobile fixant droit devant lui. Chez le sujet sain il va de 60 degrés en nasal (à cause du relief nasal) à 90 degrés en temporal et il s'étend vers le haut aux alentours de 50 degrés (en fonction de la proéminence de l'arcade sourcilière) et vers le bas à 70 degrés. La papille, dépourvue de photorécepteurs est représentée sur le champ visuel par une zone non voyante : la tâche aveugle. Elle correspond à l'arrivée du nerf optique au niveau de la rétine et elle est située entre 12 degrés et 18 degrés en nasal de l'axe visuel. Ce scotome non pathologique n'est pas perçu spontanément par le sujet.

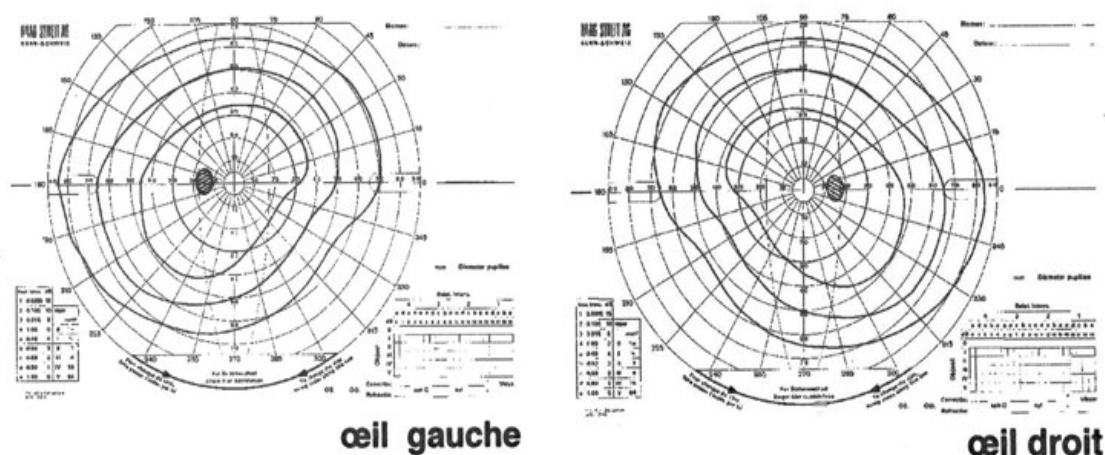


Figure 29 : Représentation du champ visuel normal de l'œil gauche et de l'œil droit (représentation du champ visuel monoculaire : Goldmann). Le champ visuel est la portion d'espace dans laquelle l'œil immobile (fixant un point) est capable de détecter des stimuli visuels. Lors de cette périmétrie (Goldmann) le patient est assis, face à une coupole, la tête reposant sur une mentonnière, et l'œil examiné fixe le point central. Un point lumineux (dont l'intensité lumineuse varie entre chaque essai) est déplacé sur la coupole, de la périphérie vers le centre. Le champ visuel de chaque œil est reporté sur un schéma où le centre est le point de fixation.

2. Comment mettre en évidence une HLH ?

L'outil utilisé pour diagnostiquer une amputation du champ visuel d'origine centrale telle que l'hémianopsie latérale homonyme est une périmétrie ou une campimétrie. La périmétrie est une exploration dynamique du champ visuel monoculaire dans une coupole alors que la campimétrie est une étude du champ visuel sur un écran plat.

1.1. Périmétrie cinétique de Goldmann

Cette évaluation du champ visuel nécessite une coupole hémisphérique qui reçoit un niveau d'éclairement homogène. L'examineur peut choisir la taille et l'intensité lumineuse du point présenté. Le patient regarde le point de fixation central et l'examineur déplace le spot de la périphérie au centre en commençant par un spot large de luminance forte pour étudier les limites périphériques du champ visuel puis il recommence avec un spot de taille plus réduite et de luminance plus faible (Figure 30).

Le patient indique quand il perçoit la lumière présentée. Le point est alors noté sur un schéma sur lequel sont représentés des cercles concentriques ou parallèles allant de 10 degrés en 10 degrés jusqu'à 90 degrés et centrés par le point de fixation. L'ensemble des points relevés avec le même spot sont réunis en un tracé constituant un isoptère.

Le périmètre de Goldmann permet l'exploration du champ visuel central, de la totalité du champ visuel périphérique et de la papille. Cette périmétrie a pour inconvénient d'être un examen « opérateur-dépendant », la fiabilité des résultats est donc liée à l'expérience du praticien et à la coopération du patient examiné. La reproductibilité des mesures est ainsi limitée.

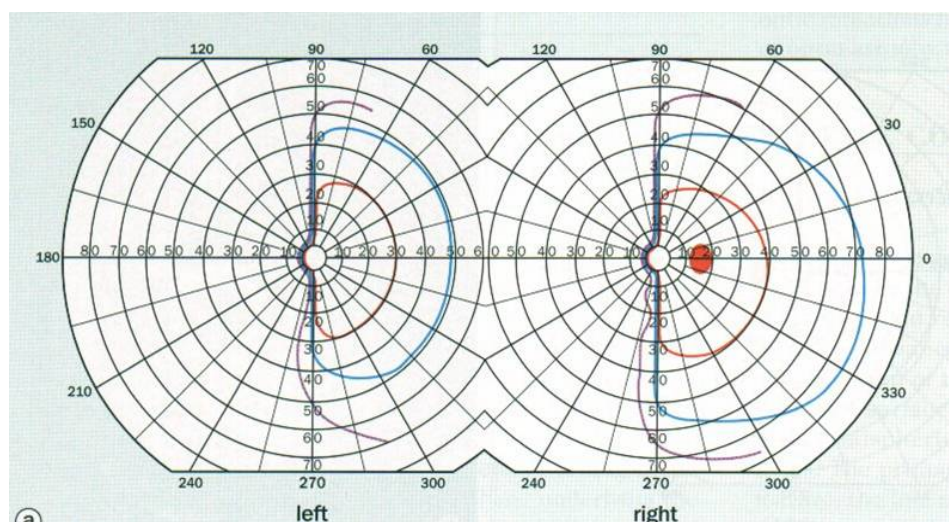


Figure 30 : Résultat d'un champ visuel Goldmann mettant en évidence une amputation du champ visuel gauche : HLHg. Le champ visuel de l'œil gauche est présenté à gauche (left) et le champ visuel de l'œil droit est présenté à droite (right). La tâche rouge apparaissant dans le champ voyant droit de l'œil droit, représente la tâche aveugle (arrivée du nerf optique au niveau de la rétine) elle n'apparaît pas dans le champ visuel gauche de l'œil gauche car elle est confondue avec l'amputation (HLHg).

1.2. Périmétrie statique automatisée de type Humphrey (Figure 31)

Cette évaluation du champ visuel fait appel à la quantification de la sensibilité rétinienne en un certain nombre de localisations prédéterminées du champ visuel (Vighetto, 1998). On projette

sur toute la surface d'un écran, de façon fixe et à des endroits présélectionnés, un point lumineux de taille définie dont on fait varier l'intensité lumineuse. Cette méthode permet de visualiser immédiatement l'étendue et la profondeur des atteintes et ce d'une manière précise, fiable et reproductible. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'elle nécessite un temps d'examen plus long (de 12 à 15 minutes), donc des ressources attentionnelles plus importantes, ce qui impose de limiter l'exploration au 30 degrés centraux, même chez un sujet sain (Risse et Delplace, 1998). Il existe d'autres outils permettant l'évaluation du champ visuel, telles que l'octopus, la périmétrie à haute résolution spatiale ou « *ring perimetry* » de Frisen, la périmétrie aux courtes longueurs d'ondes, que nous n'avons pas utilisé et que nous ne décrirons pas ici.

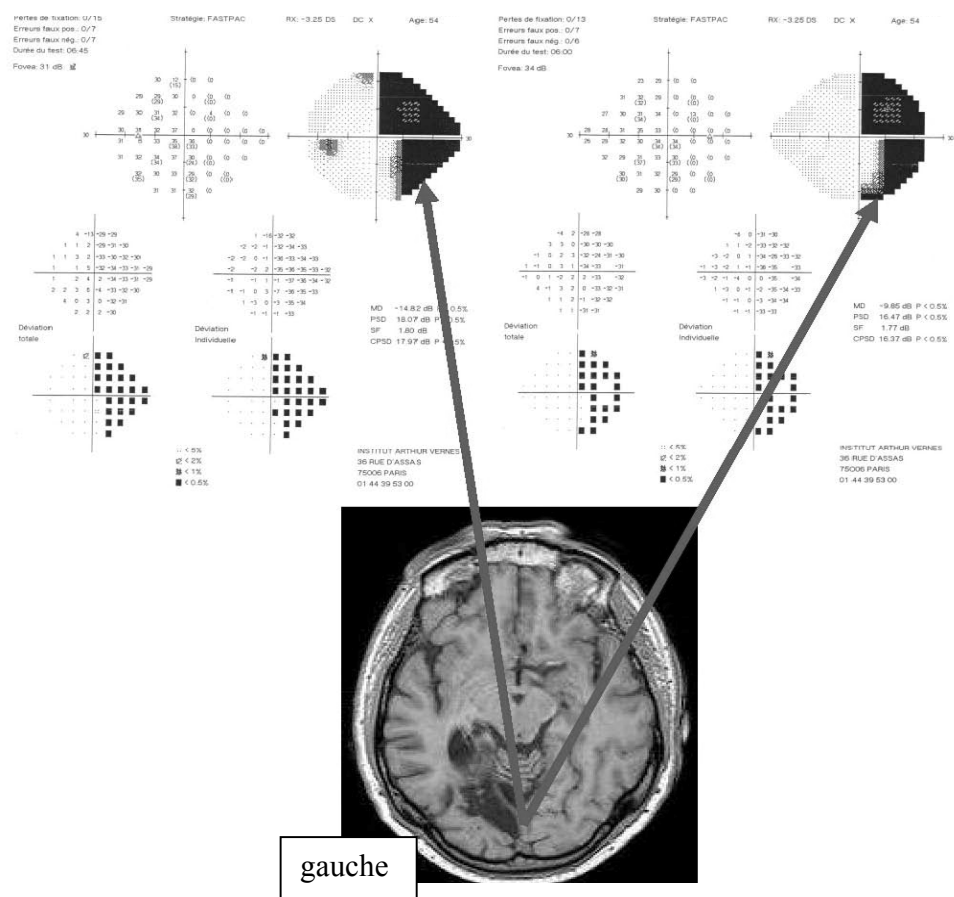


Figure 31 : IRM (coupe axiale T1) mettant en évidence une lésion occipitale inféro interne gauche (la gauche est à gauche, la droite est à droite) engendrant une HLH droite mise en évidence à l'aide d'un champ visuel type Humphrey : champ visuel automatisé, SITA-Fast, 24/2, évaluant les 30° centraux du champ visuel de chaque œil.

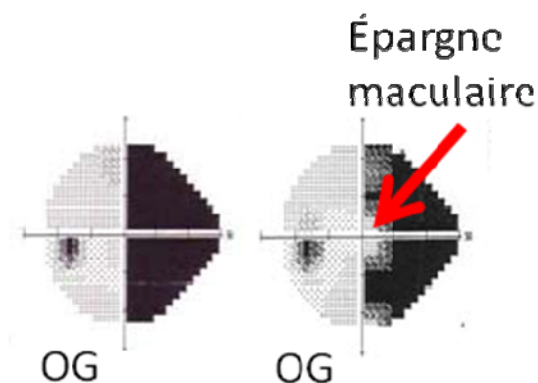


Figure 32 : Périmétrie automatisée Humphrey SITA FAST 24/2. A gauche champ visuel d'un œil gauche avec une hémianopsie latérale homonyme droite avec une épargne maculaire, à droite champ visuel d'un œil gauche avec une hémianopsie latérale homonyme droite sans épargne maculaire.

lésion occipitale droite HLHg sans épargne maculaire

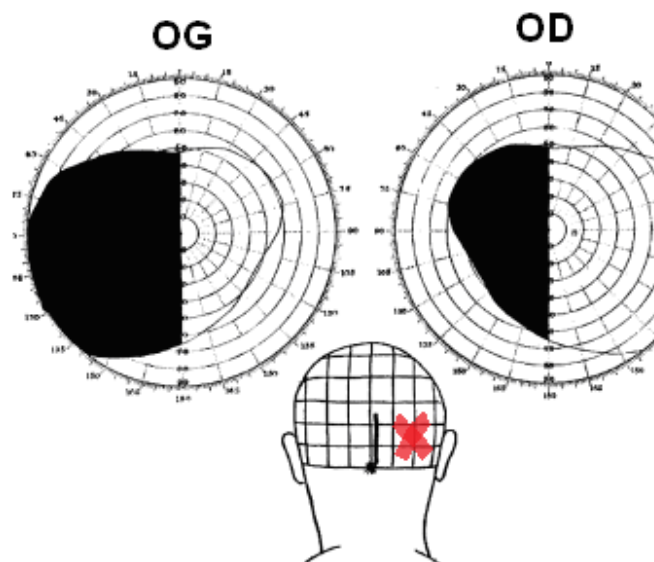


Figure 33 : Champ visuel d'un soldat de la première guerre mondiale décrit dans l'étude de Holmes, souffrant d'une lésion occipitale droite, engendrant une Hémianopsie Latérale Homonyme gauche sans épargne maculaire. (Figure tirée de Leff, 2004).

La vision est une fonction supérieure car nous voyons essentiellement avec notre cerveau. En effet, d'une manière très schématique l'œil transmet l'information et le cerveau la traite (comme nous l'avons vu lors du premier chapitre). Une lésion corticale (rétrochiasmatique) peut donc provoquer un trouble visuel d'origine centrale se traduisant par une amputation du champ visuel ou un trouble plus élaboré de la vision en fonction de la localisation lésionnelle.

La forme clinique la plus fréquente d'amputation du champ visuel après une lésion rétrochiasmatique est l'hémianopsie latérale homonyme (HLH) (Chokron, 2004). Ce trouble est en effet présent chez 30% des patients ayant eu un accident vasculaire cérébral (Zang et *al.*, 2006). Une lésion du cortex visuel primaire V1 engendre la perte de vision consciente de la plupart des informations visuelles, dans le champ visuel controlatéral à la lésion (Holmes, 1918, Teuber, Battersby, et Bender, 1960, Weiskrantz, Warrington, Sander et Marshall, 1974) et l'HLH est usuellement définie *comme un déficit du champ visuel dans lequel la vision est abolie dans la moitié du champ visuel controlatéral à une lésion occipitale unilatérale sans altération oculaire* (Hécaen, 1972). Ce déficit est dit latéral « homonyme » puisqu'il affecte la même étendue de champ visuel pour les deux yeux c'est-à-dire l'hémirétine temporale de l'œil contralésionnel et l'hémirétine nasale de l'œil ipsilésionnel (Figure 31). Ainsi, un patient avec une lésion occipitale droite présentera une hémianopsie latérale homonyme gauche et une lésion occipitale gauche provoquera une HLH droite (Chokron, 1996) (Figure 31 et 34). Le plus souvent, le déficit hémianopsique est congruent : les atteintes au niveau des deux yeux sont symétriques au point qu'on peut les superposer (Perenin, 1992). Lorsque l'hémianopsie touche le méridien vertical c'est-à-dire tout le champ visuel latéral, on parle d'hémianopsie sans épargne maculaire (Figure 33). On trouve également des hémianopsies incomplètes, dont le champ visuel latéral n'est pas complètement amputé, la partie centrale (ou macula) étant épargnée : on parle alors d'hémianopsie avec épargne maculaire (Chokron, 1996) (Figures 32, 34, 35). L'épargne résulterait d'une préservation du territoire vasculaire du pôle occipital, les zones du champ visuel préservées correspondant à des régions corticales épargnées (Zhang, 2006). D'autres auteurs ont également proposé l'idée d'une double représentation corticale du champ visuel central, expliquant l'épargne de celui-ci en cas de lésion unilatérale (Brysbaert, 2004) (Figures 35 et 36).

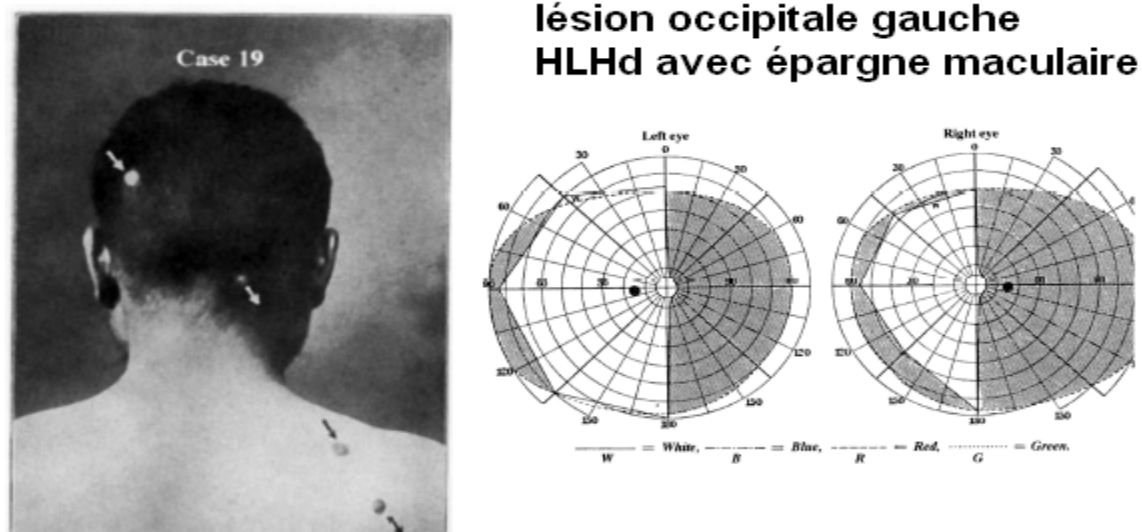


Figure 34 : Photo d'un soldat souffrant d'une lésion occipitale causée par une balle. Ainsi que les champs visuels (Goldmann) mettant en évidence une Hémianopsie Latérale Homonyme droite avec une épargne maculaire. (Figures tirées de Leff, 2004).

OBSERVATION 98.217. — B... Camille, 22 ans, 39^e rég. d'Artillerie, blessé le 2 juillet 1915 par éclat d'obus région pariéto-occipitale gauche, a été transporté immédiatement au poste de secours, puis évacué sur l'ambulance 10/14 où il a été trépané (cicatrice non pulsatile).

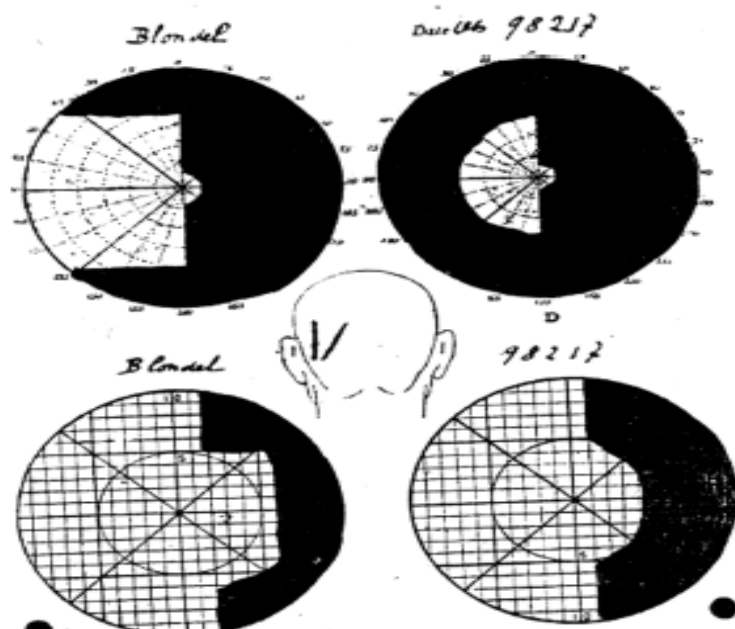


Figure 35 : Champs visuels d'un soldat français de la première guerre mondiale souffrant d'une Hémianopsie Latérale Homonyme gauche avec épargne maculaire, décrit par Morax. (Figure tirée de Leff, 2004).

2. Etiologie et corrélat anatomique de l'HLH

L'HLH peut être une étape antérieure ou ultérieure à l'évolution d'une cécité corticale (Chokron, 1998). L'étiologie la plus fréquente de l'hémianopsie est l'accident vasculaire cérébral (qu'il soit ischémique ou hémorragique) en effet 70% des accidents vasculaires impliquant les artères cérébrales postérieures, entraîneraient une HLH (Pambakian et Kennard, 1997). Mais il peut aussi s'agir d'une tumeur, d'une anoxie cérébrale, d'une lobectomie occipitale, d'un traumatisme crânien ou d'un processus dégénératif tel que l'atrophie corticale postérieure (Benson et *al.*, 1988 ; Chokron, 1996 ; Kerkhoff, 1999 ; Zhil, 2000 ; Delaj et *al.*, 2010), d'une leucoencéphalopathie multifocale progressive processus qu'on peut observer chez certain patient VIH (virus de l'immunodéficience humaine : responsable du syndrome d'immunodéficience acquise (sida), qui est un état affaibli du système immunitaire) (Diller et Thomson, 2007) ou même comme signe précurseur du VIH (Gharai, Venkatesh, Sinha, Garg, Ghosh, 2012) ou d'une forme d'épilepsie (status epilepticus amauroticus) (Shaw, Kim, Millett, 2012). C'est cependant la topographie des lésions et leur étendue (non leur nature) (Figures 36, 37), qui détermine l'aspect de l'hémianopsie (Schaison-Cusin, 1991, Tant, Cornelissen, Kooijman, Brouwer, 2002 ; Huxlin, 2008). Cependant le fait qu'il n'y ait pas de lésion visible à l'imagerie n'exclut pas la présence d'une amputation du champ visuel d'origine corticale en effet Brazis, Lee, Graff-Radford, Desai, Eggenberger (2000) ont observé chez 4 patients une HLH sans lésion visible, les étiologies de ces patient étaient les suivantes : une variante de Heidenhain de la maladie de Creutzfeldt-Jacob, une atteinte dégénérative, une ischémie visible uniquement à l'aide de la TEP (Tomographie par Emission de Positons) car trop petite, et une Hyperglycémie non ketotique (Lavin et *al.*, 2005). Un cas d'HLH transitoire a été décrit lors d'une aura migraineuse chez une patiente de 27 ans, quatre heures après l'épisode son champ visuel s'est alors significativement amélioré, et un an après la patiente confirme n'avoir jamais représenté d'épisode d'amputation du champ. Ce cas reste cependant très rare (Goodwin, 2011).

Quarante pour cent des HLH impliquent des lésions du lobe occipital, 30% du lobe pariétal, 25% du lobe temporal, et 5% du tractus optique et du noyau géniculé latéral (Huber, 1992).

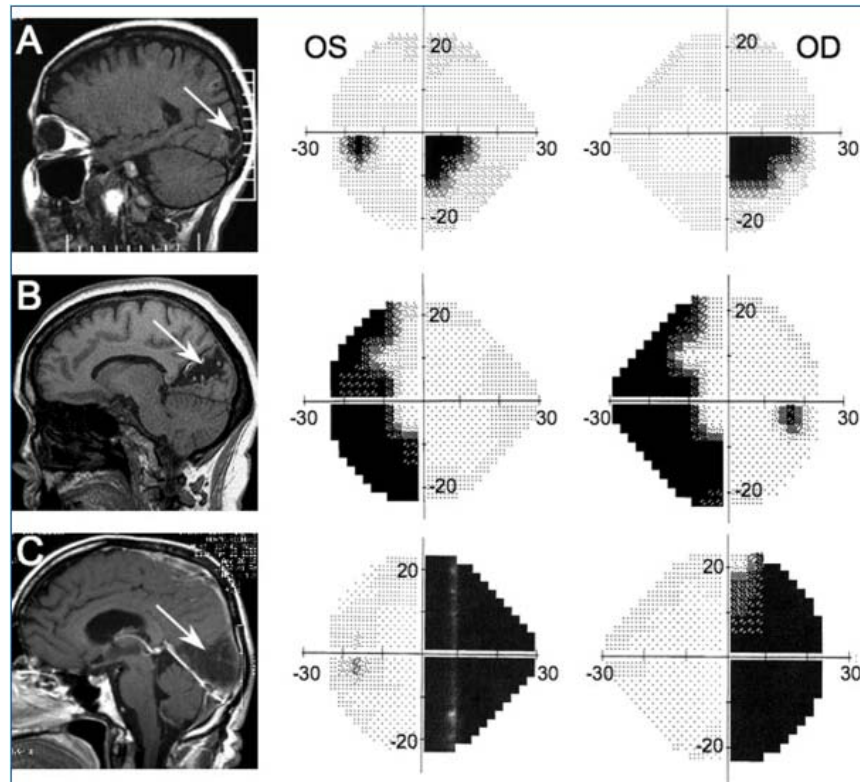


Figure 36 : Images d'IRM (Images par Résonance Magnétique) de trois patients souffrant d'une lésion occipitale unilatérale (A : lésion gauche, B : lésion droite et C : lésion gauche) à la suite d'un AVC (accident vasculaire cérébral) provoquant une amputation du champ visuel, les lésions sont signalées sur les coupes IRM par une flèche blanche. Le champ visuel correspondant à chaque patient est présenté sur la droite (champ visuel Humphrey 24-2). Le champ visuel automatisé Humphrey teste le champ visuel de chaque œil indépendamment (OS : œil gauche et OD : œil droit). Les régions en noir, sur la cible représentant le champ visuel, signale la perte du champ visuel. (Figure tirée de Huxlin, 2008).

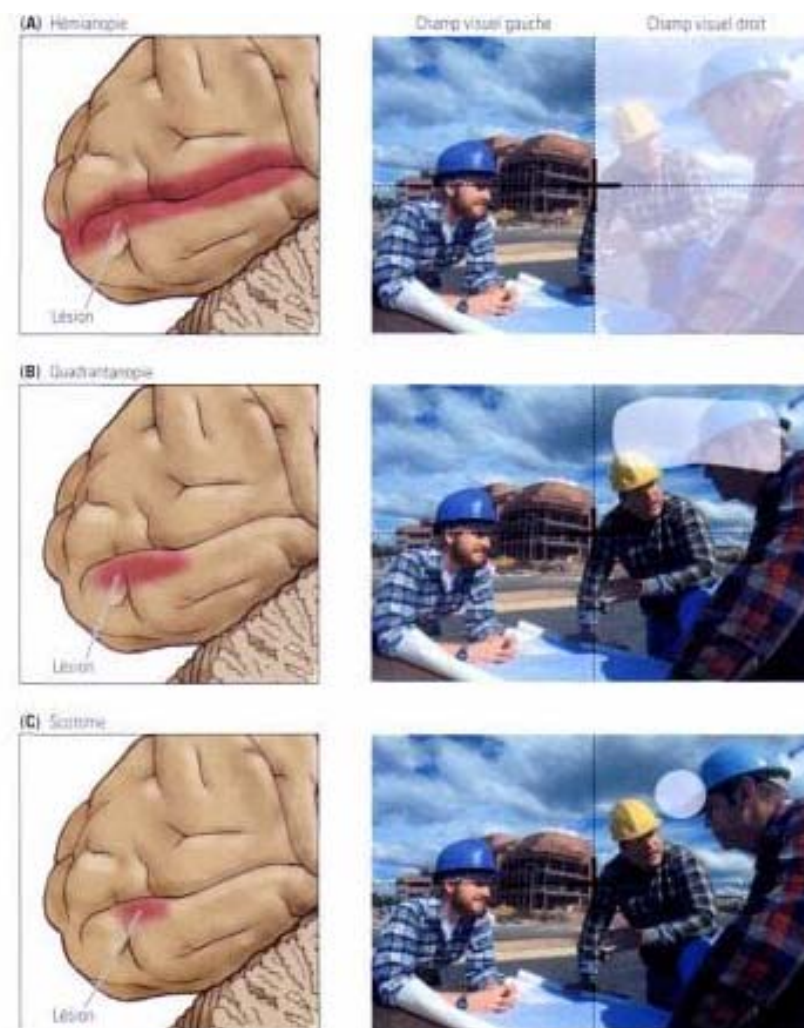


Figure 37 : Représentation de l'effet d'une lésion occipitale en fonction de son étendue, au niveau du champ visuel, reflétant les caractéristiques rétinotopiques du cortex visuel primaire V1. (A) Figure du haut : amputation de tout le champ visuel droit latéral, à la suite d'une lésion occipitale unilatérale gauche (V1) (B) Figure du milieu : amputation du quadrant supérieur à la suite d'une lésion moins importante de V1, et (C) Figure du bas : scotome à la suite d'une lésion plus petite au niveau de V1. (Figure tirée de http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_02/d_02_cr/d_02_cr_vis/d_02_cr_vis.html)

3. Signes associés

Des hallucinations visuelles peuvent s'installer en phase aiguë du trouble en raison de la décharge anarchique des neurones pendant la mise en place de la réorganisation cérébrale ou au début de la rééducation (Poggel, Müller-Oehring, Gothe, Kenkel, Kasten, Sabel, 2007).

Des troubles de la mémoire visuelle peuvent aussi survenir (Pearce, 2005). Dans le cadre d'une atteinte postérieure, une hémignégligence peut être associée à l'hémianopsie, il est alors impératif de la détecter car elle risque de majorer le trouble visuel. Ces deux troubles se distinguent en plusieurs points : tout d'abord la topographie des lésions occasionnant une hémignégligence ou une HLH diffère. En effet l'HLH est consécutive à une lésion des voies visuelles primaires, alors que l'hémignégligence survient le plus souvent à la suite d'une lésion pariétale droite. D'autre part, ces deux types de troubles ne se mesurent pas sur les mêmes référentiels, l'HLH est un déficit d'un hémichamp visuel mesuré à partir des coordonnées rétiniennes. L'hémignégligence est un déficit d'un hémiespace mesuré à partir d'un référentiel égocentrique (Chokron, 2011).

Lorsque l'hémianopsie est pure, les patients ne présentent pas d'anosognosie, de troubles de la mémoire ou de désorientation, ils peuvent également faire preuve de capacités visuelles non-conscientes lorsqu'ils doivent répondre à des stimuli présentés dans leur champ aveugle (Cf. chapitre ci-après sur le *blindsight*). En revanche, ils peuvent souffrir de troubles consécutifs à la perte du champ visuel (Papageorgiou et al., 2007). En effet, Il s'agit d'une atteinte particulièrement handicapante pour les patients, car la vision est l'élément perceptif le plus utilisé dans les activités quotidiennes. De plus, la vision contribue en grande partie à la mise en mémoire, et la perte d'une partie du champ visuel gêne cette fonction (Kerkhoff, 2000). Beaucoup de patients rapportent des difficultés lors de leurs déplacements, en particulier à l'extérieur de chez eux (Marigold, Weerdesteyn, Patal, et Duysens, 2007) car il leur arrive de heurter des personnes ou des obstacles se présentant dans leur champ aveugle. Ils éprouvent également des difficultés pour trouver des objets dans leur champ visuel aveugle, avec d'importantes difficultés dans la conduite automobile notamment. Ils se plaignent aussi de rencontrer des difficultés pour se construire une vision d'ensemble de l'environnement visuel (Pambakian et Kennard, 1997). Enfin, ils évoquent des difficultés en lecture (Leff et al., 2000 ; McDonald, Spitsyna, Shillcock, Wise et Leff, 2006) notamment pour lire les mots en entier, pour savoir où se termine une ligne (HLHd) ou trouver la ligne suivante (HLHg) (Zihl, 2000) ou font des erreurs de lecture (HLHg) (McDonald et al. 2006). Schuett (2009) propose même une rééducation des mouvements oculaires pour ce qu'il appelle la « dyslexie hémianopsique ». Leff, Spitsyna, Plant, Wise, (2007), ont décrit l'alexie hémianopsique comme un trouble de la lecture associé à une HLHd. Celle-ci se traduit par une bonne lecture

de mots isolés mais par des difficultés pour générer des saccades oculaires suffisantes pour lire tout un texte. Ils ont pu observer que ces patients présentaient une lésion au niveau du lobe occipital médian gauche et si la lésion s'étendait au niveau du gyrus fusiforme alors les patients souffraient d'une alexie pure.

Face aux difficultés causées par la perte de vision, certains patients utilisent les mouvements de la tête et des yeux pour explorer leur environnement. Toutefois, tous les patients n'appliquent pas spontanément ce type de stratégies compensatrices. En effet, selon Zihl (2000) bien qu'ils aient une parfaite conscience de leur trouble, seul 40% des patients compensent leur déficit de façon spontanée. Notons que la compensation spontanée dépend de la préservation des fibres de connexions corticales et sous-corticales (Zihl, 2000) qui soutiennent les processus d'orientation spatiale de l'attention ainsi que les mouvements oculaires volontaires. De plus, en enregistrant les mouvements oculaires de ces patients, certains auteurs (Chedru, Leblanc, et Lhermitte, 1973 ; Meienberg, Zangemeister, Rosenberg, Hoyt, et Stark, 1981 ; Pambakian, Mannan, Hodgson, et Kennard, 2004 ; Zihl, 1995 ; Machner, 2009) ont observé un manque de stratégie visuo-exploratoire. Celui-ci se traduit par des saccades en plus grand nombre, de plus courtes amplitudes, et des fixations plus longues que les contrôles. Par conséquent l'exploration visuo-spatiale chez ces patients est désorganisée, non automatique et demande une mobilisation des ressources attentionnelles pour être réalisée. Ils passent également plus de temps à orienter leur regard dans leur champ aveugle que dans leur champ visuel sain (Ishiai et *al.*, 1987). Mais ceci selon Zihl (1995) est une stratégie de compensation, en effet en orientant leur regard dans leur champ aveugle cela leur permet de faire tomber les cibles visuelles dans leur champ sain et donc de les percevoir, mais bien souvent au détriment de leur champ visuel sain pour lequel finalement ils dédient moins d'attention (Paramei et *al.*, 2008). Machner et *al.* 2009, observent également une différence entre les patients HLHd et HLHg. Les patients HLHd ont plus de difficultés que les HLHg. Papageorgiou et *al.* (2007) a bien expliqué que les gênes subjectives reportées par les patients ne sont pas corrélées avec leur amputation objectivée par une périmétrie, mais semble liée à l'étendue de l'épargne maculaire. Il précise alors, que l'évaluation de l'HLH doit considérer plusieurs choses : l'examen du champ visuel, les capacités d'exploration visuelle, mais aussi un questionnaire subjectif. Durant les trois premiers mois consécutifs à la lésion rétrochiasmatique uni ou bilatérale on peut observer une récupération spontanée (phénomène

de diaschisis) dans 38,4 % des cas, dont la probabilité d'occurrence est fortement proportionnelle au temps écoulé depuis la lésion (Zang, Kedar, Lynn, Newman, Biousse, 2006), qui reste cependant très limitée : 3 à 7° (Zhil, 2000). Cette récupération spontanée prend forme lors des 6 mois qui suivent la lésion, après ce délai le trouble est considéré comme « chronique ». La récupération diminue avec le temps : à un mois, il existe 50 à 60% de chances de récupération, contre seulement 20% à six mois. Dans la plupart des cas, la récupération spontanée apparaît dans les 3 mois qui suivent la lésion. Il est cependant très rare que la récupération soit complète (Poppelreuter, 1917), moins de 10% des patients concernés retrouvent leur champ visuel complet (Pambakian et Kennard, 1997). Les patients développent également des stratégies d'exploration légèrement différentes des sujets sains afin de compenser leur déficit (Pambakian *et al.*, 2000).

La récupération dépend également du site lésionnel. Certains auteurs (Bosley, Dann, Silver, Alavi, Kushner, Chawluk, Savino, Sergott, Schatz, Reivich, 1987) ont montré à l'aide d'une étude en PET un lien entre la récupération du champ visuel et la localisation de la lésion. Leur étude a été menée chez cinq patients souffrant d'une HLH à la suite d'un accident ischémique du cortex visuel primaire ou des aires visuelles associatives (régions externes du cortex visuel). En phase aiguë (juste après l'épisode ischémique), les patients présentaient tous un déficit métabolique (au niveau de la consommation de glucose) au niveau du cortex strié. Puis, deux patients ont ensuite récupéré au niveau du champ visuel. Un second PET a été alors réalisé montrant une réduction de la lésion métabolique et un meilleur métabolisme au niveau du cortex strié. Il est important de préciser que les deux patients en question présentaient une lésion au niveau de régions externes du lobe occipital. Les trois autres patients de cette étude qui présentaient une lésion au cœur même du cortex visuel primaire (V1) n'ont pas récupéré au niveau du champ visuel. Ils ne présentaient pas de différence de métabolisme au second PET par rapport au premier réalisé en phase aiguë post AVC.

Seule une minorité de patients HLH est capable de compenser efficacement ce handicap. Ainsi, il est étonnant de ne pas compter plus d'accidents graves au sein de cette population. Ce constat est sans doute à mettre en relation avec une capacité à utiliser des connaissances inconscientes sur les informations visuelles se trouvant dans leur champ visuel aveugle, fonctionnant comme un système d'alerte.

Après avoir décrit l'hémianopsie latérale homonyme comme un trouble visuel massif, nous allons voir qu'en réalité une certaine forme de traitement reste possible dans le champ visuel aveugle des patients hémianopsiques.

On a longtemps pensé que sans V1 la vision n'était pas possible mais Riddoch (1917) a attiré l'attention sur le fait que les patients pouvaient percevoir du mouvement dans leur champ visuel aveugle. Le cortex visuel primaire serait ainsi indispensable à la vision consciente (Stoerig et Cowey, 1995) mais même en son absence, le patient pourrait conserver une forme de vision non consciente appelée '*blindsight*'. Ce phénomène est détaillé ci-dessous.

II. Le *blindsight*

1. Définition du *blindsight* : déficit absolu dans l'hémichamp visuel amputé ?

Les premières études mettant en évidence le phénomène de 'vision aveugle' ou '*blindsight*' ont été réalisées chez le singe. A partir de 1965 et durant huit ans, Weiskrantz a étudié les capacités visuelles du singe Helen après ablation du cortex visuel strié dans son champ visuel contralésionnel. Helen a progressivement développé des capacités visuelles résiduelles comme la capacité à localiser des objets dans le champ visuel aveugle. Weiskrantz (1974) a alors introduit le terme de « *blindsight* » pour définir l'ensemble des capacités visuelles inconscientes présentes dans le champ visuel contralésionnel. Ces premiers travaux sur le singe remettent donc en question le caractère absolu et définitif des amputations du champ visuel. En conséquence, de nombreuses études ont ensuite été menées chez les patients hémianopsiques afin de caractériser ces capacités visuelles résiduelles.

Chez l'homme, en 1973, Pöppel, Held et Frost ont observé que des patients porteurs d'une amputation du champ visuel à la suite d'une lésion occipitale, sont capables, sur ordre de l'examineur, d'orienter avec précision une saccade oculaire vers une cible lumineuse positionnée dans leur champ aveugle, bien qu'ils affirment, n'avoir aucune conscience de ces

stimuli et qu'ils pensent répondre au « hasard ». Perenin et Jeannerod (1975) à la suite des études menées chez le singe ont voulu tester les capacités de discrimination et de localisation dans l'hémichamp aveugle de 6 patients hémianopsiques lors de la présentation de lettres ou de formes géométriques. Les patients pointaient correctement et précisément la localisation du flash dans le champ visuel aveugle, malgré le fait qu'ils ne le voyaient pas consciemment. Plus tard, trois patients porteurs de lésions bilatérales et deux patients porteurs de lésions unilatérales du cortex visuel strié ont manifesté des performances correctes dans une tâche durant laquelle ils devaient discriminer la direction d'une cible en mouvement (Perenin, 1991). Weiskrantz (1974) a également mis en évidence d'étonnantes capacités de comparaison de formes et d'orientation de lignes chez le patient D.B hémianopsique gauche.

Ce phénomène est alors qualifié par Weiskrantz, Warrington, Sanders et Marshall, (1974) de *blindsight*, il a été également dénommé « vision aveugle », « implicite » ou « inconsciente ». Aujourd'hui le *blindsight* est défini comme « un ensemble de capacités résiduelles dans les zones du champ visuel s'étant révélées aveugles lors de l'examen périmétrique. Ces capacités sont généralement mises en évidence par des méthodes psychophysiques dites de choix forcés, impliquant des réponses le plus souvent motrices (Figure 38), indépendantes de l'expérience consciente du sujet » (Perenin, 1992). L'HLH serait donc à considérer non pas comme une absence totale de vision dans l'hémichamp aveugle, mais plutôt comme un défaut de vision consciente. Le patient hémianopsique DB décrit par Weiskrantz et *al.* (1974), était notamment capable, en l'absence de toute vision consciente, d'orienter correctement la main vers un stimulus en fonction de son inclinaison sans pour autant percevoir consciemment le stimulus. Stoerig (1996) estime que le *blindsight* s'exprime de manière privilégiée dans les tâches de choix forcé.

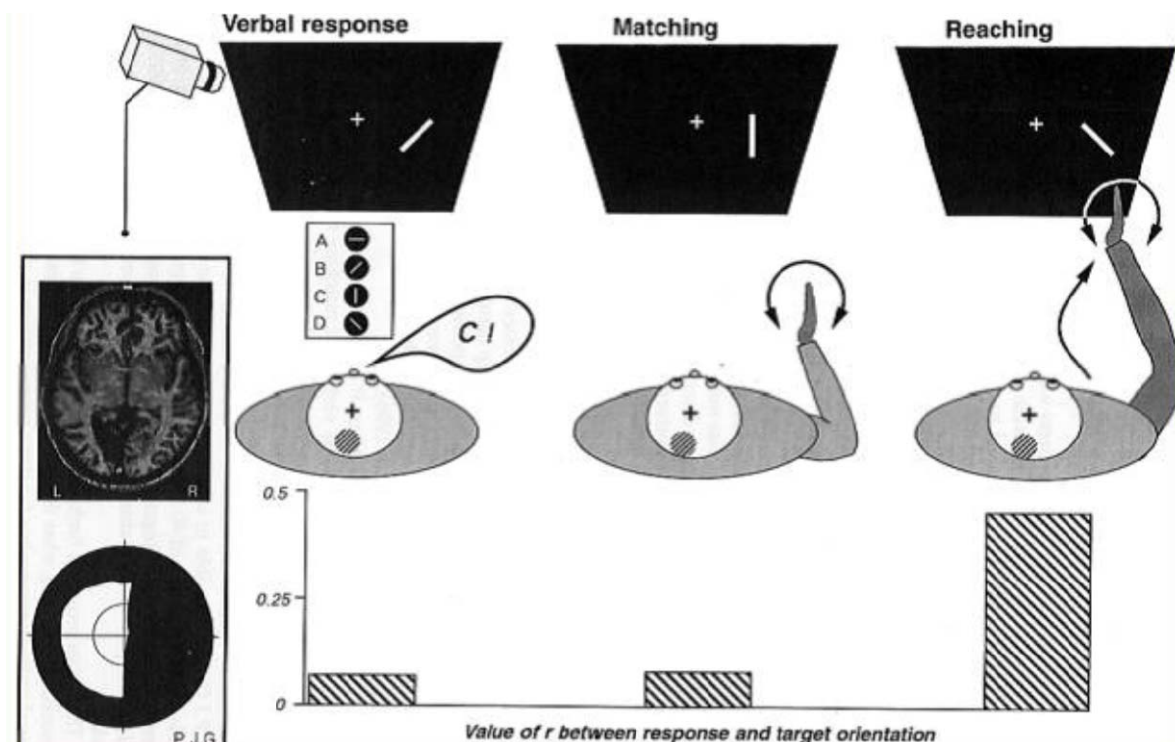


Figure 38 : Représentation d'un patient souffrant d'une hémianopsie latérale homonyme droite à la suite d'une lésion occipitale gauche, testé dans 3 conditions afin d'évaluer ses capacités de traitement de l'orientation (présentation de barre dans différentes orientations) et de la taille des objets (présentation de rectangle dans différentes tailles) dans son champ visuel aveugle. La première condition demandait une réponse verbale en choix forcé dans laquelle le patient devait indiquer verbalement l'orientation ou la taille de la cible. La seconde, demandait au patient un appariement gestuel qui nécessitait de réaliser avec sa main l'orientation ou la taille dans laquelle était présentée la cible. Et la dernière demandait une réponse motrice dans laquelle il devait insérer une carte bien orientée dans la fente (représentée par la barre dans différentes orientations) ou attraper entre son pouce et son index un rectangle (en fonction de sa taille). Les performances obtenues dans le champ visuel aveugle dans les 2 premières conditions (verbale et appariement gestuel) étaient au niveau du hasard, alors que les réponses motrices étaient systématiquement influencées par l'orientation et la taille des cibles présentées dans le champ visuel aveugle. Ces résultats apportent des preuves supplémentaires à l'existence de deux traitements visuels distincts : la voie du « quoi » pour reconnaître les objets et la voie du « où » pour les attraper. (Figure tirée de Perenin et Rossetti, 1996).

2. Caractéristiques du *blindsight*

Ces dernières années un grand nombre de recherches a montré différentes capacités résiduelles dans le champ aveugle des patients hémianopsiques. A l'aide d'une procédure de choix forcé, les chercheurs ont mis en évidence les capacités de ces patients à détecter un stimulus visuel placé dans leur champ aveugle (Fendrich, Wessinger et Gazzaniga, 1992), à le localiser par une saccade oculaire (Zihl et Von Cramon, 1980), par un pointage manuel (Perenin et Jeannerod, 1975), à détecter des stimuli en mouvement (Riddoch 1917) ou changeant d'intensité lumineuse (Barbur, Ruddock et Waterfield, 1980), à discriminer des objets (Weiskrantz et *al.*, 1974) et des expressions émotionnelles sur un visage (Pegna, Khateb, Lazeyras, et Seghier, 2005). Par exemple, chez le patient hémianopsique GY, la comparaison entre deux stimuli, chacun étant présenté dans un hémichamp visuel, était possible, pour des attributs tels que la couleur, ou le mouvement. En revanche, ce patient ne pouvait comparer différents degrés de luminance (Morland et *al.*, 1999 ; Ffytche, Guy et Zeki, 1996). Ce phénomène a également été mis en évidence chez le singe, avec les nombreux travaux de Cowey et Stoerig. Les singes hémisphérectomisés, sont également capables de discriminer les flux lumineux, les orientations et les couleurs (Stoerig et Cowey, 1997 ; Stoerig, Zontanou et Cowey, 2002). De plus, les temps de réaction vers des stimuli présentés dans l'hémichamp visuel sain peuvent être facilités par la présentation préalable d'un stimulus dans l'hémichamp aveugle (Cowey, Stoerig et Le Mare, 1998). Certains auteurs montrent également que les couleurs peuvent être traitées dans le CV aveugle. En effet, les patients parviennent à détecter des changements de couleurs dans le CV aveugle (Cowey et Stoerig 2001). Cependant, la possibilité de traiter les couleurs dans le champ hémianopsique en l'absence de perception consciente du stimulus reste une question très controversée. Une autre manière de mettre en évidence les capacités résiduelles des patients dans leur CV aveugle est d'étudier l'effet d'un stimulus présenté dans le CV aveugle, sur le traitement d'un autre stimulus présenté dans le CV voyant. Par exemple lors d'une tâche de complétion de forme (McCarthy, James-Galton et Plant, 2006), ou lors du traitement de la couleur (Cowey, Stoerig, 2001 ; Marzi et *al.*, 2009). La moitié de la forme est présentée dans le CV voyant, et les patients doivent deviner la forme complète du stimulus. Les résultats vont dans le sens d'un traitement implicite de la forme dans le CV aveugle. Cependant, pour le traitement de la couleur les résultats ne sont pas encore convaincants.

Certaines études (Zihl, 1980) ont montré que ces capacités de discrimination inconscientes observées chez ces patients sont un effet d'apprentissage, car avec un entraînement on peut les renforcer. En revanche l'utilisation du *blindsight* en rééducation visuelle est encore très discutée (Zihl, 1980) et nous reviendrons plus loin sur cette question (au cours du Chapitre 3, de la PARTIE 3).

3. Deux types de *blindsight*

Weiskrantz (1989) différencie deux types de *blindsight*. Le premier caractérise les capacités résiduelles inconscientes dans le CV amputé d'un patient hémianopique, appelé « *blindsight* de Type I ». Le second caractérise les capacités résiduelles conscientes dans le CV aveugle appelé « *blindsight* de type II ». En 2005, Danckert et Rossetti ont proposé une nouvelle taxonomie pour classer les capacités résiduelles décrites dans le *blindsight*. Tout d'abord « l'action-*blindsight* » qui serait mis en évidence par une action motrice dans le CV aveugle dans le but de localiser une cible. Puis « l'attention *blindsight* » (type II, selon la classification de Weiskrantz) liés aux processus attentionnels, inclurait l'inhibition de retour, l'orientation de l'attention, et la détection du mouvement dans le CV aveugle. L'action motrice ne serait donc pas nécessaire pour le mettre en évidence. Notons que ces deux types de *blindsight* semblent être sous-tendus par le même réseau : rétino-tectal. Enfin, « l'*agnosopsia* », (type I, selon la classification de Weiskrantz) est un terme utilisé par Zeki et Ffytche (1998) pour caractériser les capacités résiduelles inconscientes des patients, lorsqu'il s'agit de deviner la nature perceptive des stimuli dans leur CV aveugle.

Avant d'aborder les substrats anatomiques du *blindsight*, il semble primordial d'évoquer à nouveau la caractéristique principale du cortex visuel primaire : V1, qui possède cette qualité de rétinitopie. En effet cette aire visuelle représente chaque point du champ visuel perçu par le sujet. Une lésion au niveau de cette aire corticale entraîne par conséquent, et ce comme longuement évoqué précédemment, une amputation du champ visuel correspondant fidèlement à l'étendue de la lésion, ce qui rappelle également le rôle crucial de V1 dans la perception consciente (Rees, 2007).

De nombreux auteurs ont mené des études en imagerie fonctionnelle (IRMf) dans le but d'explorer et de mieux connaître les activités neuronales sous-jacentes à cette perception sans conscience. Malgré l'engouement durant ces dernières années pour cette thématique autant passionnante qu'étrange, la base structurelle du *blindsight* reste floue et peu connue. En effet dans la littérature abondante sur ce sujet nous pouvons trouver trois hypothèses qui tentent d'expliquer ce phénomène terriblement intrigant de capacités visuelles résiduelles que nous pouvons observer chez les patients HLH. La première est l'hypothèse de l'épargne corticale, des îlots corticaux préservés au sein même du cortex occipital lésé permettraient ces capacités (Covey et Stoerig, 1991 ; Morland et al., 2004 ; Stoerig et Covey, 1991). La seconde, évoque la présence d'une voie sous-corticale qui prendrait le relais : les informations passeraient par la voie retino-tectale (décrite précédemment) ou par le pulvinar voir même directement par des projections du CGL au cortex extra-strié. La dernière postule l'existence d'une connexion calleuse.

4. Hypothèses explicatives / substrats neuronaux du *blindsight*

4.1. Hypothèse de l'épargne corticale

Ce phénomène de *blindsight* ne s'observe pas chez tous les patients. C'est pourquoi certains auteurs suggèrent que les capacités de vision résiduelles peuvent exister grâce à la présence d'îlots de neurones dans le cortex visuel primaire dont le fonctionnement est préservé, à la suite de la lésion (Fendrich, Wessinger et Gazzaniga, 2001 ; Morland, Le, Carrol, Hoffman, et Pambakian, 2004). En effet, certains auteurs ont mis en évidence une relation étroite entre les zones du champ visuel dans lequel un patient présente ce phénomène de *blindsight*, et les zones correspondantes préservées au niveau du cortex strié. Ainsi, pour Fendrich et al. (2001), l'existence d'un résidu fonctionnel de cortex strié est une condition nécessaire à l'apparition du phénomène de *blindsight*. Cette hypothèse explicative ne fait cependant pas l'unanimité. En effet, certaines études vont à l'encontre de cette hypothèse, dans la mesure où des phénomènes analogues au *blindsight* ont été mis en évidence chez des patients après ablation complète de l'aire visuelle primaire : V1 (Perenin et Jeannerod, 1978).

D'autre part, certaines études réalisées en imagerie fonctionnelle ne mettent pas en évidence d'activité résiduelle au niveau du cortex strié chez les patients hémianopsiques (Stoerig, Kleinschmidt et Frahm, 1998). Enfin, d'autres auteurs (Ptito, Herbin, Boire et Ptito, 1996) observent une préservation de ces capacités résiduelles à la suite d'une lésion de V1, et non chez des patients présentant une lésion du colliculus supérieur. Ce résultat suggère qu'il existerait une voie secondaire, par laquelle passerait l'information.

4.2. Hypothèse d'un réseau secondaire : réseau sous-cortical

Tout d'abord, il est important de bien avoir en tête la structure des voies visuelles. La rétine qui tapisse le fond de notre œil reçoit les informations visuelles venant de l'extérieur et les transmet au nerf optique, qui part de l'œil pour rejoindre le cerveau. Le nerf optique de chaque œil se croise au niveau du chiasma optique, les informations visuelles sont ici scindées par œil, ce croisement permet alors de mêler les fibres de chaque rétine et permet de les regrouper en fonction de l'hémichamp visuel en question, cette fois les informations visuelles sont alors scindées par hémichamp visuel et non plus par œil. Du chiasma sort alors ce regroupement de fibres appelées bandelettes optiques, qui se propage dans chaque hémisphère cérébral. La bandelette optique droite regroupe alors les informations visuelles des deux hémirétines droites de chaque œil provenant de la moitié droite du champ visuel. Ces fibres passent par un relai sous-cortical (CGL) pour aller ensuite se projeter au niveau du cortex visuel primaire, on parle alors des radiations optiques. Il existe une autre voie visuelle qui semble responsable du phénomène de *blindsight*, qui emprunte la voie sous-corticale appelée aussi voie « colliculaire » qui passe par un noyau gris au niveau du tronc cérébral qui s'appelle le colliculus supérieur, pour se projeter au niveau de structures sous-corticales mais également corticales.

De là émane une explication alternative à ce phénomène de *blindsight*, qui découle directement du fait que les patients perçoivent le mouvement dans leur CV aveugle. En effet, Riddoch (1917) a observé chez des patients souffrant d'une lésion de V1, une capacité à traiter des stimuli en mouvement, alors que les stimuli statiques n'étaient pas perçus. Ce traitement peut s'expliquer par l'existence de nombreuses projections du colliculus supérieur et du pulvinar vers les aires extra-striées (Rodman et al., 1989). Ce réseau formerait une voie sous-corticale : voie rétino-tectale, appelée également voie extra-géniculo-striée, qui assumerait les

capacités de *blindsight*. D'après des travaux chez le singe et l'homme (Humphrey et Weiskrantz, 1967), les structures impliquées dans les phénomènes de vision aveugle pourraient être localisées dans la voie dorsale. En effet, celle-ci recevrait des afférences de structures sous-corticales telles que le colliculus supérieur et le pulvinar. Les capacités des patients à diriger une action motrice vers une cible placée dans le CV aveugle non reconnue consciemment, vont en faveur de cette projection directe geniculo-extra-striée (Weiskrantz et al., 1974). D'après Milner (1995) l'hypothèse selon laquelle la voie dorsale pourrait fonctionner en l'absence de V1, est la principale explication neurobiologique du *blindsight*. En effet, le fonctionnement des neurones de la voie dorsale peut persister à la suite d'une destruction ou d'une inactivation de V1 (Girard et al., 1992). Par ailleurs, d'autres recherches ont établi un lien entre l'*action-blindsight* et le cortex pariétal. Pour que les performances des patients soient au dessus du seuil du hasard il est nécessaire que leur réponse motrice soit simultanée à la présentation de la cible visuelle. Ce traitement *on-line* de l'information, serait caractéristique de la voie dorsale (Rossetti et Pisella, 2002). De plus, Danckert et al., 2003, ont constaté que l'intégrité du cortex pariétal postérieur est fondamental pour que les patients présentent un *action blindsight*. Par ailleurs, une autre étude a montré que l'orientation d'une saccade ou du geste moteur de la main sont perturbés à la suite d'une atteinte des colliculi supérieurs dans la cadre d'une lésion de V1 (Mohler et Wurtz, 1977) ceci souligne fortement l'importance des aires sous-corticales dans le *blindsight*. Effectivement l'aire MT reçoit des connexions venant principalement de V1 (Rodman, Gross et Albright, 1989).

Donc, la perte de l'aire V1 peut être palliée par d'autres aires qui restent actives par l'entrée d'informations visuelles. Cette hypothèse postule alors qu'il peut exister des capacités de vision résiduelle dans le champ amputé en l'absence d'une perception consciente (Morland et al., 1999 ; De Gelder, Vroomen, Pourtois et Weiskrantz, 1999 ; Danckert et Goodale, 2000 ; Pegna, Khateb, Lazeyras et Seghier, 2005 ; Danckert et Rossetti, 2005). Les voies sous-corticales qui court-circuitent V1 et projettent directement sur les aires visuelles secondaires, comme V5 (pour la détection du mouvement), le thalamus, le tronc cérébral, l'hypothalamus ou encore l'amygdale (pour la catégorisation d'émotions) sous-tendent le phénomène de *blindsight*. Une étude confirme cette dernière hypothèse, puisqu'en effet les auteurs (Ptito et Leh, 2007) ont pu montrer l'implication des colliculi supérieurs chez des patients hémisphérectomisés.

Les données anatomiques, fournies par les travaux d'imagerie cérébrale, permettent d'établir les bases neurales du *blindsight*. Goebel et *al.* (2001) ont notamment mis en évidence, chez le patient GY, des activations extra-striées dans l'hémisphère lésé, sans activation dans le cortex visuel primaire.

Morland et *al.* (1999) estiment que les capacités de reconnaissance des couleurs, et des orientations, sont prises en charge par l'aire V5, sans passer par V1. D'autres auteurs ont montré la sollicitation de l'activation de l'amygdale comme voie possible du *blindsight*, notamment dans une tâche de reconnaissance des émotions chez un patient qui présentait une cécité corticale (Pegna et *al.*, 2005) (Figure 39). De Gelder et *al.* (1999) ont mis en évidence, l'utilisation de la voie ventrale au travers de potentiels évoqués. Ainsi, une voie alternative à V1, dans le cortex visuel primaire, se dirigerait directement vers les aires visuelles secondaires, dans le cortex extra-strié, en passant par le colliculus supérieur et le pulvinar. D'autres études menées sur la catégorisation de visages, vont dans le sens de cette hypothèse d'un réseau sous-cortical. Certains auteurs (Vuilleumier, Armony, Driver et Dolan, 2003) ont montré que les visages représentant la peur activeraient l'amygdale *via* le colliculus supérieur et le pulvinar. Les visages seraient plutôt traités par les basses fréquences spatiales, qui emprunteraient la voie sous-corticale magnocellulaire. Pegna et *al.*, (2005), ont observé chez un patient présentant une cécité corticale à la suite d'une lésion occipitale bilatérale, des capacités à traiter les émotions sur un visage. Ceci se traduit à l'imagerie par une activation de l'amygdale droite. De même, Morris et Weiskrantz (2001) ont observé à l'aide d'une étude en IRMf que l'émotion d'un visage pouvait être traitée de manière inconsciente dans le CV aveugle des patients, et activerait la voie visuelle sous-corticale colliculo-thalamo-amygdalienne (épargnée par la lésion de V1). Et plus récemment Tamietto, de Gelder, (2008 et 2010) ont remarqué des capacités « d'*affective blindsight* ». C'est-à-dire que les stimuli véhiculant des émotions sont traités inconsciemment. L'information visuelle arriverait à l'hémisphère *via* l'amygdale, en court-circuitant V1 par les colliculi.

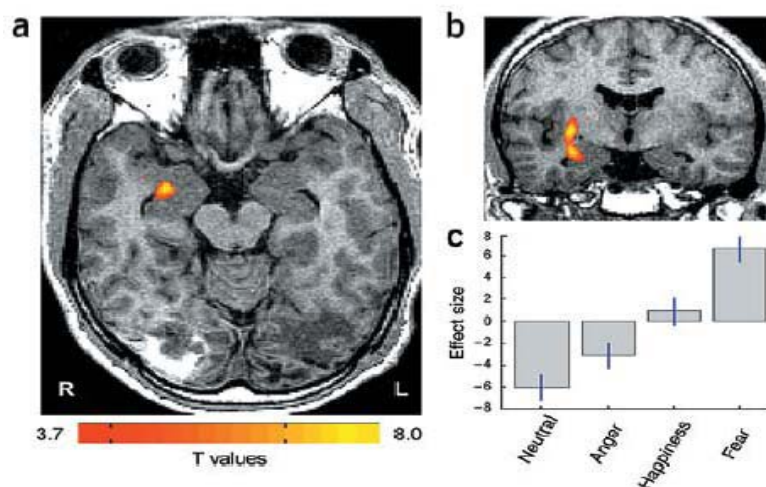


Figure 39 : Représentation de l'activation obtenue lors d'un protocole IRMf en bloc, au niveau des structures amygdaliennes pour le contraste suivant : visages véhiculant des émotions (peur, colère et joie) vs visages neutres. Le pic d'activation se situe au niveau de la partie latérale de l'amygdale droite et du putamen (Cf coupe coronale figure (b)). La coupe axiale figure (a) met en évidence la lésion occipitale bilatérale du patient (qu'on ne peut pas voir sur la coupe coronale). (Figure tirée de Pegna *et al.*, 2005).

Les études récentes apportent des éléments en faveur de l'implication du CGL thalamique (Cowey, 2010 ; Schmid *et al.*, 2010). Les résultats obtenus par celles-ci vont dans le sens d'un traitement visuel indépendant de V1, à la fois lors d'une étude comportementale (avec ou sans inactivation temporaire du CGL) et d'une étude menée en IRMf (procédure présentée figure 40). Les auteurs ont montré chez un macaque souffrant d'une lésion de V1, la contribution du CGL pour la vision. La perception des stimuli présentés à forts contrastes dans le champ visuel aveugle du macaque engendre une activation significative au niveau des aires extra-striées : V2, V3, V4, V5/ (MT), sulcus temporal supérieur (FST) et l'aire pariétale latérale (LIP), indépendamment de V1. De plus les performances recueillies lors de la tâche comportementale de détection permettent de mettre en avant les capacités de l'animal à localiser les stimuli au niveau de son champ visuel aveugle. Alors qu'à la suite d'une inactivation provisoire au niveau du CGL du côté de l'hémisphère lésé (au niveau de V1) il n'y a plus de réponse ni en IRMf ni du point de vue comportemental. Ces résultats démontrent bien que les projections directes qui unissent le CGL au cortex extra-strié ont un rôle de contribution fonctionnelle pour le *blindsight*.

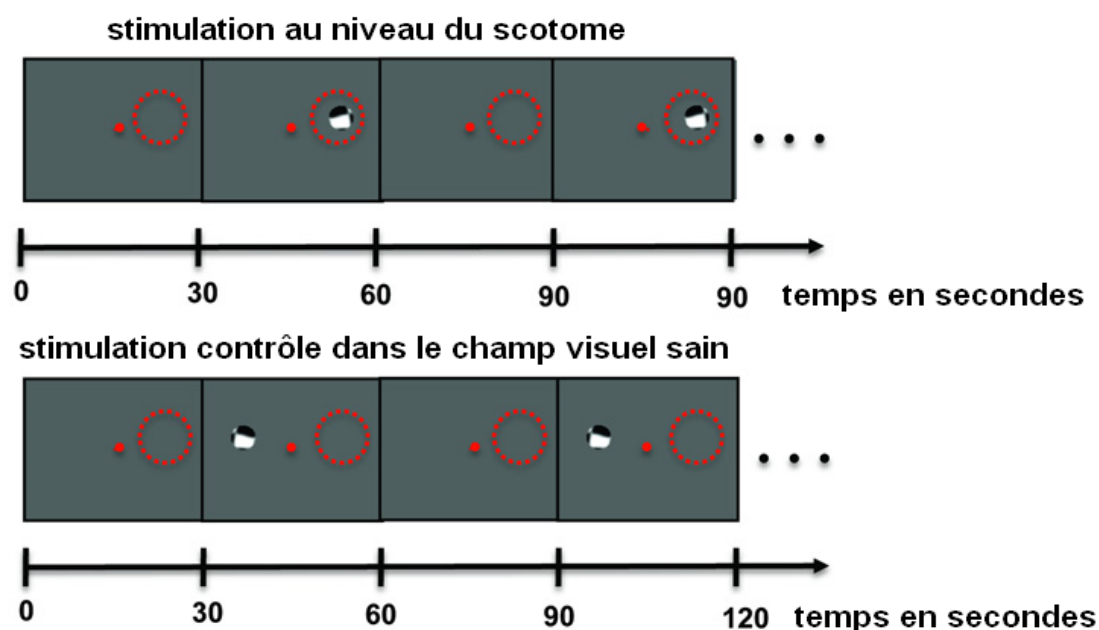


Figure 40 : Stimuli utilisés (damiers noir et blanc rotatifs) dans l'étude de Schmid et *al.*, 2010 permettant de comparer l'activation cérébrale lors de la stimulation du scotome (indiqué en pointillés rouges) région du champ visuel amputé à la suite de la lésion de V1 (figure du haut), et dans le champ voyant (condition contrôle) (figure du bas). (Figure tirée de Schmid et *al.*, 2010).

4.3. Les limites de l'IRMf dans l'étude du *blindsight*

Les études comportementales sur le *blindsight* démontrent avec conviction l'existence d'une voie sous-corticale responsable des capacités résiduelles obtenues dans le CV aveugle des patients. Cependant les techniques d'imagerie ne nous permettent pas encore de suivre le déroulement temporel de l'information qui passerait très certainement par les structures sous-corticales. Pour cette raison le lien entre les structures sous-corticales et le *blindsight* n'est pas encore clairement établi (Sahraie et *al.*, 1997). C'est pourquoi Leh, Johansen et Ptito (2006) et Ptito et Leh (2007) ont utilisé une autre technique : l'imagerie par tenseur de diffusion (DTI). Cette technique permet d'explorer la plasticité cérébrale, la compensation et la réorganisation à la suite d'une lésion cérébrale (Leh et *al.*, 2006). Les patients qui ont participé à cette étude sont des patients avec une amputation du CV à la suite d'une hémisphérectomie, afin d'exclure l'explication du *blindsight* par l'épargne corticale.

Ils ont pu constater l'existence de projections ipsi et contralatérales des colliculi supérieurs vers les aires visuelles primaires et associatives chez les patients de type I : *attention blindsight*, en revanche chez les patients qui ne présentent pas ce type de *blindsight*, ils n'observent pas ces connexions. Ce résultat souligne le rôle prépondérant des colliculi supérieurs dans le *blindsight*.

Toutefois cette hypothèse connaît des limites. En effet, le réseau sous-cortical n'accède pas aux informations colorées, ce qui ne permet pas d'expliquer les capacités de discrimination de couleurs observée chez certains patients (Stoerig et Cowey, 1991).

L'intégrité de V1 semble être une condition nécessaire pour accéder à la vision consciente (Stoerig et Cowey, 1995). Ce qui explique que les patients HLH ne traitent pas consciemment l'information visuelle dans leur CV aveugle. Cependant, les résultats précédemment décrits nous amènent à nous interroger sur la possibilité de court-circuiter V1 ? (Sincich, 2004). Certains auteurs ont montré qu'un patient HLH peut percevoir consciemment des phosphènes dans son champ visuel aveugle. Silvanto, Cowey, Lavie et Walsh, 2007, remettent alors en question le rôle de V1 dans la perception visuelle consciente.

4.4. Dernière hypothèse explicative : connexion inter-hémisphérique

Récemment, Bridges et *al.* (2008) ont décrit à l'aide de l'imagerie par tenseur de diffusion des connexions anatomiques caractéristiques chez ces patients HLH qui pourraient très bien expliquer la présence de *blindsight*. Ils ont décrit 3 voies qui pourraient être liées au *blindsight* ou du moins utilisées lors du *blindsight*. La première qui est observée à la fois chez les sujets sains et chez le patient hémianopsique GY : court-circuite V1 (Sincich et *al.* 2004) et relie le CGL à l'aire ipsilatérale de la perception du mouvement V5/MT+. Comme chez les sujets sains cette voie est préservée chez le patient hémianopsique GY à la fois dans son hémisphère gauche (lésé) et dans son hémisphère droit (sain). De plus, et ceci représente l'observation la plus étonnante de cet article, le patient GY présente deux autres voies inter-hémisphériques qui sont observées uniquement chez lui et non chez les sujets sains. Un faisceau de fibre blanche traversant le splénium qui connecte le CGL d'un hémisphère à l'aire V5/MT+ de l'autre hémisphère (contralatéral). L'autre voie relie V5/MT+ des deux hémisphères *via* une connexion trans-calleuse (Figure 41).

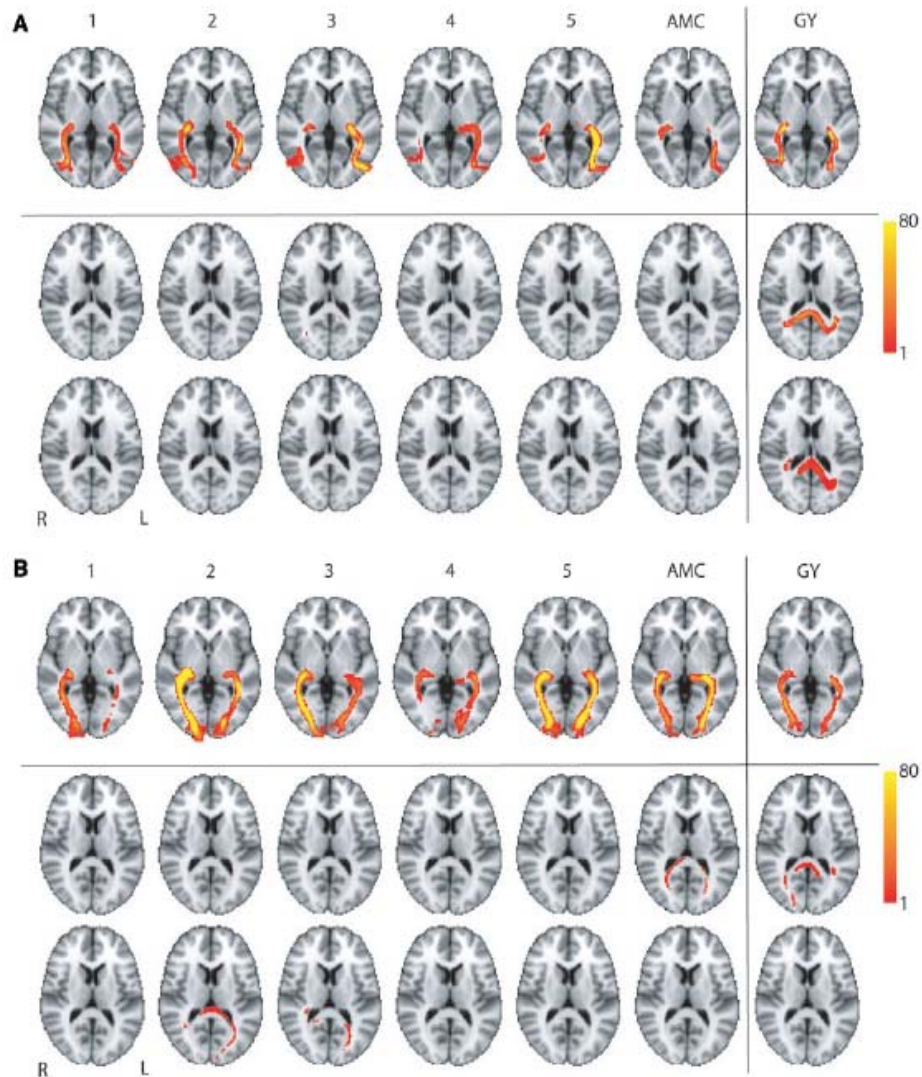


Figure 41 : (A) Fibres reliant le CGL et l'aire MT+/V5, (B) et le CGL et V1, pour tous les participants contrôles (à gauche) et le patient GY présentant du *blindsight* (à droite) présentés dans un espace normalisé. (A) Pour tous nous observons des fibres ipsilatérales, les fibres court-circuitent V1 et connectent le noyau géniculé latéral à l'aire du mouvement (MT+/V5) ipsilatérale des deux côtés. Cependant seul GY présente une voie reliant le CGL à l'aire du mouvement (MT+/V5) controlatérale, *via* le splénium. (B) Chez tous les participants on observe une absence de fibres controlatérales reliant le CGL à V1. (Figure tirée de Bridge et *al.*, 2008).

Nous pouvons facilement établir un lien entre les résultats précédents (Bridge et *al.*, 2008) et ceux obtenus par Morland et *al.* (2004) qui montrent une activation dans l'aire V5/MT ipsilatérale à la suite d'une stimulation du champ visuel sain. La connexion détectée entre le

CGL contralesionnel et V5/MT+ (Bridges et *al.*, 2008) chez le patient GY peut alors expliquer cette observation. Les résultats obtenus par Bridges sont également consistants avec ceux de Goebel et *al.* (2001) obtenus à l'aide de l'IRMf, qui ont mis en évidence des activations extra-striées chez le patient hémianopsique GY dans l'hémisphère lésé, durant une tâche sollicitant les capacités de *blindsight*. Nelles et *al.* (2007) ont également observé des activations bilatérales au niveau des aires visuelles extra-striées chez 13 patients HLH et plus particulièrement une activation du cortex extra-strié ipsilatérale après une stimulation dans l'hémichamp amputé (Figures 42, 43, 44, 45).

Henriksson et *al.* (2007) et Raninen et *al.* (2007) ont eux aussi observé une activation au niveau du cortex extra-strié mais également au niveau du cortex visuel primaire ipsilatéral en réponse au stimulus visuel présenté dans l'hémichamp aveugle, et ce après une rééducation (impliquant une stimulation intensive du champ aveugle) (Figure 46). Silvanto, Cowey, Lavie et Walsh (2007), ont également émis l'hypothèse que le phénomène de *blindsight* serait soutenu à la fois par des activations ipsilésionnelles, et par un relais contralésionnel pour arriver à la conscience. En effet ils ont montré à l'aide de la TMS (Stimulation Magnétique Transcranienne* ou TMS, abréviation de l'anglais *Transcranial Magnetic Stimulation*) chez le même patient hémianopsique GY, qu'il pouvait ressentir consciemment des phosphènes dans son champ visuel mais seulement et uniquement lorsque la stimulation était bilatérale, c'est à dire au niveau des deux hémisphères [induisant alors deux phosphènes, un dans le champ visuel sain et un dans le champ aveugle], alors que la stimulation ipsilésionnelle unique de la région de V5/MT n'induit pas de phosphène. Ainsi ce résultat suggère le recrutement des deux hémisphères, impliquant donc une connexion inter- hémisphérique. Comme dans les études précédentes, nous pouvons alors supposer ici que V5/MT et la transmission d'information entre les deux hémisphères permettent de véhiculer le *blindsight*. La représentation corticale ipsilatérale du champ lésé chez GY implique la voie controlatérale venant du CGL droit à l'aire V5/MT+ droite, et les connexions inter- hémisphériques permettant de véhiculer et de transférer l'information (Bridges et *al.*, 2008 ; Goebel et *al.*, 2001 ; Silvanto, 2007).

* La **stimulation magnétique transcranienne** (ou TMS, abréviation de l'anglais *Transcranial Magnetic Stimulation*) est une bobine de cuivre que l'on pose sur le crane et qui envoie des impulsions magnétiques totalement indolores sur l'encéphale, et modifient l'activité des neurones situés dans ce champ magnétique.

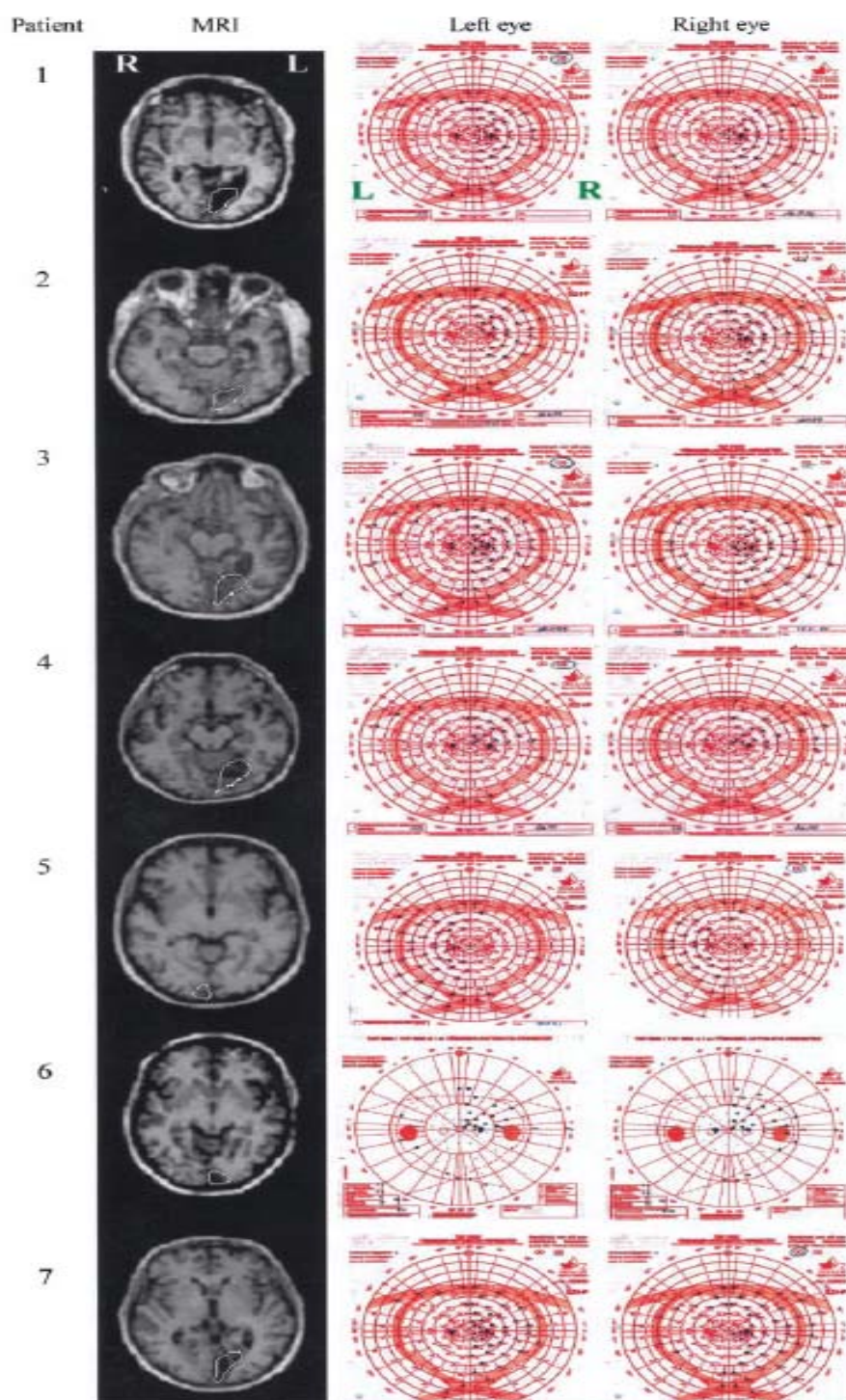


Figure 42 : Coupes axiales des IRM anatomiques des patients ayant participé à cette étude, présentant une lésion du cortex visuel (indiqué par la démarcation blanche) à la suite d'un AVC (Accident Vasculaire Cérébral). (La droite est à gauche, suivant les normes radiologiques). Le champ visuel correspondant est à droite (avec le champ visuel de l'œil gauche à gauche et le champ visuel de l'œil droit à droite). Les carrés noirs indiquent les omissions de cibles visuelles durant la périmétrie. (Figure tirée de Nelles et *al.*, 2002).

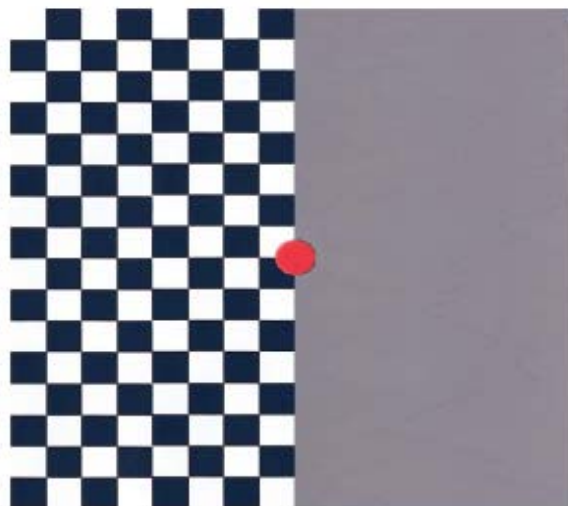


Figure 43 : Exemple d'un stimulus en damier noir et blanc, lors de la présentation dans le champ visuel gauche. (Figure tirée de Nelles et *al.*, 2002).

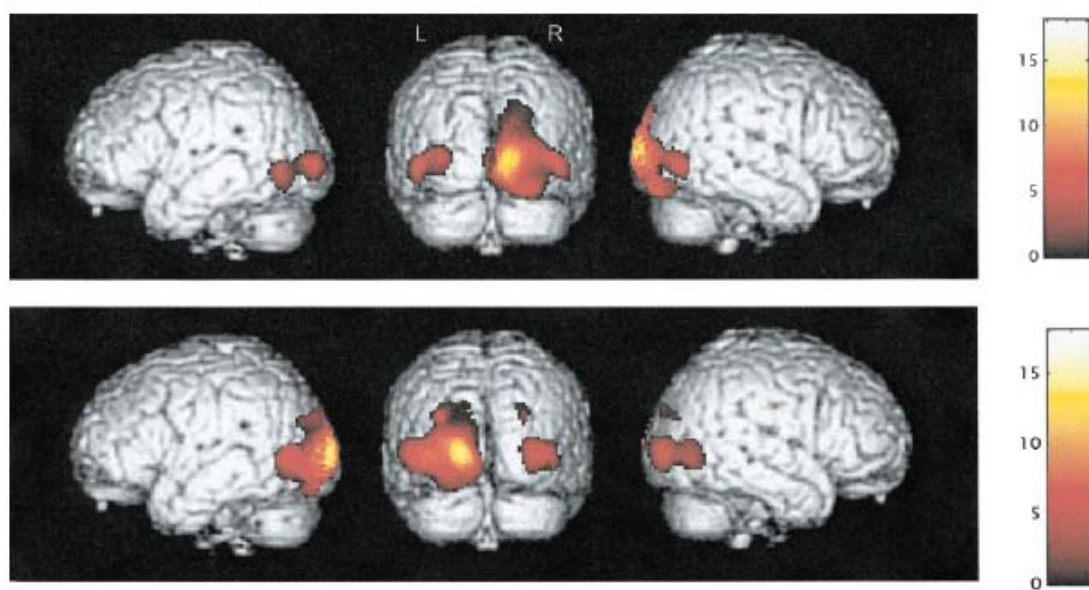


Figure 44 : Représentation des activations obtenues chez les participants contrôles durant la stimulation du champ visuel gauche (figure du haut) et du champ visuel droit (figure du bas). D'après le contraste stimulation du champ *vs* repos, $p < 0.01$ corrigé. (Figure tirée de Nelles et *al.*, 2002).

Considérées dans leur ensemble, ces données suggèrent donc qu'une connexion calleuse hyper-développée (entre CGL et MT+/V5 et/ou entre les aires MT+/V5) contribuerait à la redistribution de l'activité cérébrale et expliquerait que l'hémisphère sain devienne capable de traiter les informations visuelles issues du champ visuel ipsilatéral (controlésionnel). Leh et *al.* (2006) ont remarqué une différence importante, chez un patient hémisphérectomisé qui présente du *blindsight*, une projection ipsi et controlatérale venant des colliculi supérieurs vers de multiples aires de l'hémisphère sain alors qu'ils n'observaient pas cette projection controlatérale chez des patients hémisphérectomisés aussi mais sans signe de *blindsight*. Mais avec cette méthode il est difficile de savoir si c'est vraiment l'émergence d'un nouveau faisceau qui prend forme ou si c'est le développement d'un faisceau qui existait déjà avant la lésion qui se renforcerait au fil du temps. Car il faut se rappeler que ce patient GY avait l'âge de 8 ans au moment de sa lésion et que la probabilité d'une récupération ou d'une plasticité cérébrale et plus importante qu'à l'âge adulte.

Ceci expliquerait notamment pourquoi, dans la pratique clinique, de nombreux patients disent ressentir la présence d'un objet, mais ce après une présentation relativement longue des stimuli, probablement parce que le passage des informations nécessiterait plus de temps. Néanmoins, la plupart de ces expériences sont réalisées sur un nombre peu important de patients, et notamment les expériences en imagerie cérébrale. Il convient donc de rester prudent quand aux sites privilégiés de la plasticité cérébrale et les mécanismes sous-jacents, nous abordons cette thématique lors de la dernière partie de cette thèse.

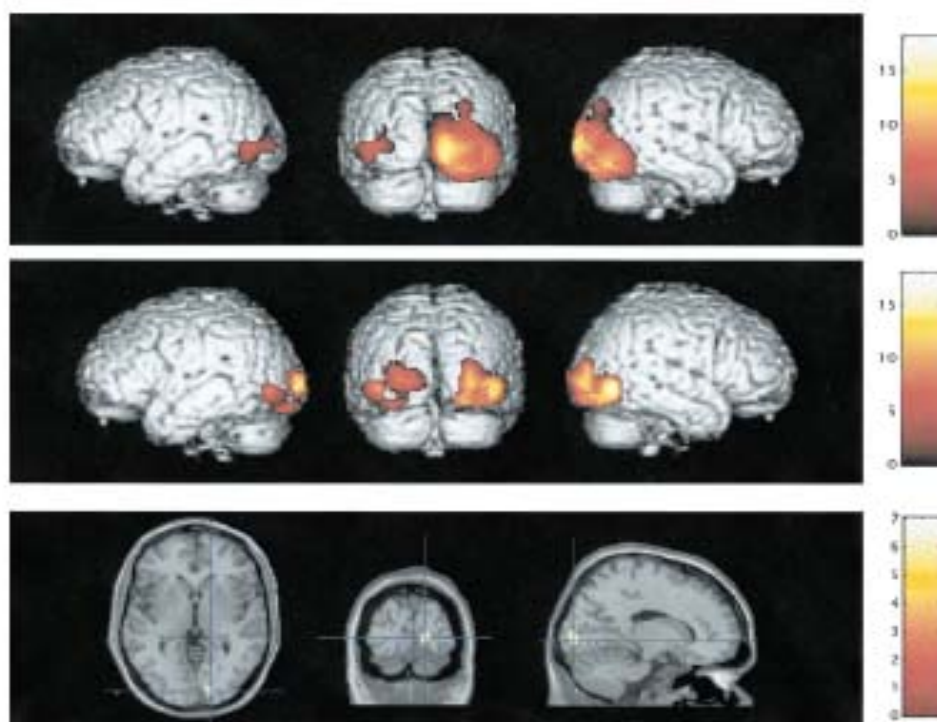


Figure 45 : Représentation des activations obtenues chez les patients hémianopsiques durant la stimulation du champ visuel gauche (figure du haut), du champ visuel droit amputé (figure du milieu) D'après le contraste stimulation du champ *vs* repos, $p < 0.01$ corrigé. La figure du bas représente les activations obtenues lors du contraste suivant : stimulation du champ visuel amputé *vs* stimulation du champ visuel droit des participants contrôles. (Coordonnées x,y,z : 16,-90,0 ; $z=6.9$; $p < 0.01$). (Figure tirée de Nelles et *al.*, 2002).

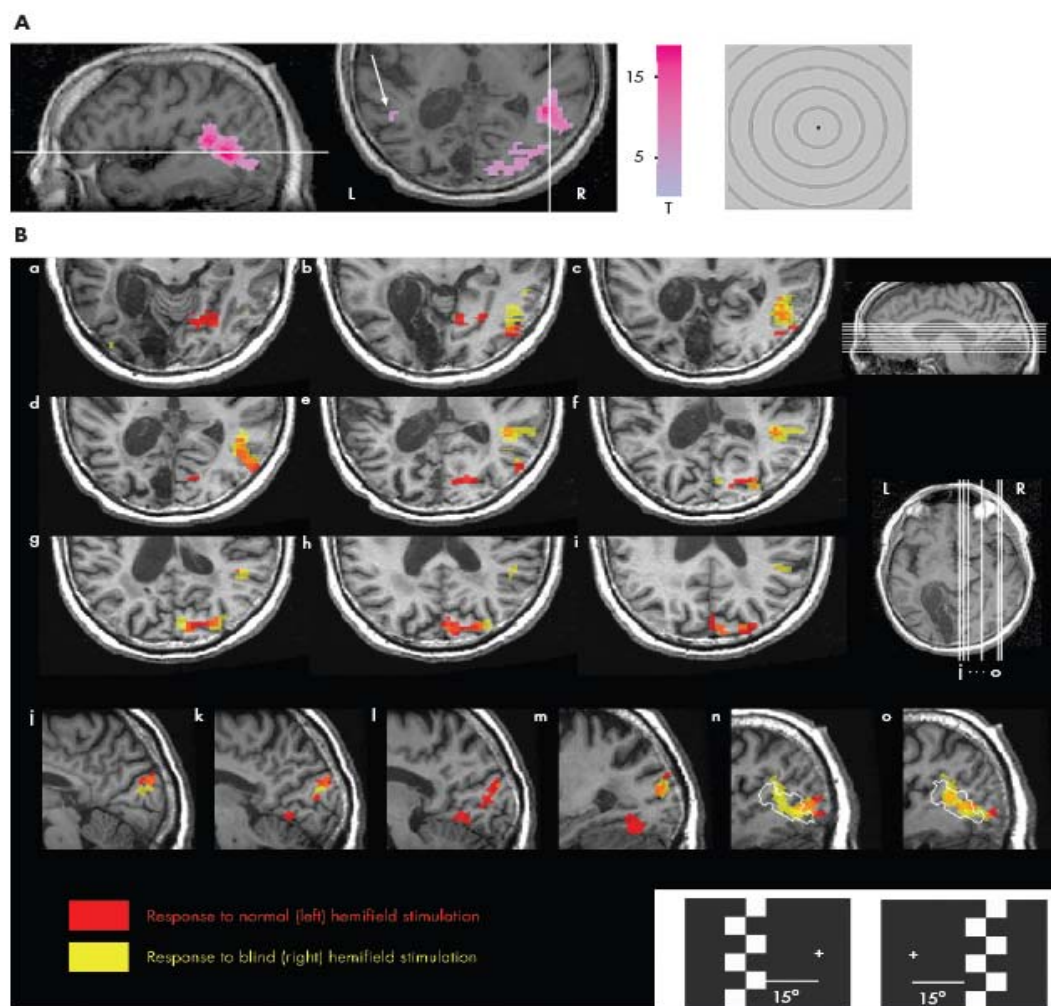


Figure 46 : Activations cérébrales obtenues en IRMf chez un patient souffrant d'une lésion postérieure gauche engendrant une amputation du champ visuel droit.

A. Tâche de rétinotopie : stimuli en damier noir et blanc s'inversant, stimulant tout le champ visuel en partant du centre et se propageant jusqu'à la périphérie.

B. Un damier noir et blanc s'inversant (induisant un mouvement), a été proposé à ce patient à la suite d'un entraînement visuel, dans son champ visuel gauche voyant : indiqué en rouge, et dans son champ visuel droit aveugle : indiqué en jaune. Sur la droite son IRM anatomique, sur la coupe axiale L : signifie gauche et R : signifie droite. Les analyses ont été réalisées sous SPM avec un seuil de $p_{\text{pwe}} < 0.05$. Neuf coupes axiales (a-i) et six coupes sagittales (j-o). La délimitation blanche sur les dernières coupes en bas à droite (n et o indique la région de V5 et les aires satellittes au niveau du sulcus temporal supérieur. (Figure tirée de Henriksson et *al.*, 2006).

4.5. Seule la voie dorsale impliquée dans le *blindsight* ?

Les études menées en IRMf chez des patients souffrant d'une lésion de V1 montrent une activation de l'aire V5 à la suite de la présentation d'un stimulus en mouvement ou clignotant dans le champ visuel aveugle (Barbur, Watson, Frackowiak, et Zeki, 1993). D'autres études mettent également en évidence une activation de la voie ventrale lors de la présentation d'images d'objets dans le champ aveugle (Goebel et *al.*, 1998). Ceci indique que les neurones de la voie dorsale et de la voie ventrale peuvent répondre de manière appropriée aux stimuli présentés dans le champ aveugle même si les patients n'ont pas conscience de ceux-ci. L'activation de la voie ventrale et dorsale semble donc jouer un rôle dans le *blindsight* mais ne permet pas d'accéder à la conscience visuelle car l'activité des aires extra-striées, a besoin d'un retour d'information de V1, pour que l'information soit perçue consciemment. Goebel et *al.* (2001) à l'aide d'une spirale rotative présentée dans le champ aveugle de deux patients hémianopsiques, ont comparé la réponse de la voie ventrale et dorsale. Ils ont obtenu à la suite de la présentation d'images d'objets dans champ visuel aveugle, une activation de V5/MT ipsilesionnelle mais aussi une activation ipsilesionnelle au niveau du cortex occipital latéral, et du gyrus fusiforme postérieur. Cependant, dans les deux cas, aucune activation du cortex visuel primaire n'a été observée.

Par conséquent l'activation de V1 semble indispensable pour accéder à la conscience même si l'accès à la conscience ne réside certainement pas dans une seule aire, le patient décrit par Silvanto et *al.* (2007) dit « percevoir » ou plutôt ressentir des phosphènes dans son champ aveugle, mais cela nécessite la stimulation simultanée des deux hémisphères. Une étude récente chez le macaque (Schmid et *al.*, 2010) menée à la fois sur des performances comportementales et des activations IRMf, a mis en exergue le rôle du corps genouillé latéral dans le *blindsight*. En effet ils ont pu observer chez des singes dont le cortex visuel primaire est lésé, qu'à la suite d'une inactivation du CGL du côté de l'hémisphère lésé les singes peuvent encore localiser des cibles à fort contraste dans l'hémichamp aveugle, et entraîne une activation des aires extra-striées (V2, V3, V4, V5/MT, FST, et le lobule pariétal inférieur). Cependant ils ne peuvent plus le faire lorsque le CGL du côté de l'hémisphère lésé est rendu inactif, soulignant le rôle des projections du CGL vers les aires extra-striées dans les capacités de *blindsight*.

4.6. Vers une localisation de la conscience

L'accès à la conscience n'est pas associé à une seule région cérébrale. En effet Lionel Naccache (2006) à la suite de nombreuses études menées à l'aide de l'IRMf (qui permet une bonne résolution spatiale) et de l'électrophysiologie (qui permet une bonne résolution temporelle) écrit que « l'inconscient est un citoyen sans frontières du cortex cérébral ». Son équipe à l'aide de protocoles utilisant la présentation de mots suivis immédiatement par un masque (induisant alors une perception subliminale, non consciente du mot présenté), observe que ces activations inconscientes concernent plusieurs régions telles que : le cortex visuel primaire, la voie ventrale (occipito-temporale), le cortex pariétal, et même certaines régions frontales (Dehaene et *al.*, 2001, Naccache et Dehaene, 2001).

Pascual-Leone et Walsh (2001) à l'aide de la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) ont mis en évidence l'importance de boucles rétroactives de V5 à V1, pour accéder à la conscience de stimuli en mouvement tels que des phosphènes. Par ailleurs, Burgess et Ali (2002) ont observé une corrélation entre l'activité de la bande gamma et la conscience chez les sujets sains. C'est pourquoi Schurger, Cowey et Tallon-Baudry, 2006 ont voulu étudier à l'aide de la MEG (Magnétoencéphalographie), l'activité de ces bandes gamma, chez un patient hémianopique droit (cérébro-lésé gauche), qui fait preuve de capacités visuelles résiduelles, et qui est capable de dire s'il est « conscient » ou pas de la présence de stimuli dans son CV aveugle. Les auteurs observent que la précision des réponses de ce patient dans une tâche de discrimination d'orientation, est au dessus du seuil du hasard qu'il soit conscient ou pas des stimuli. En revanche, il obtient des temps de réponse plus rapides pour traiter les stimuli dont il est conscient. En enregistrant l'activité cérébrale ils ont observé que l'activité oscillatoire de la bande gamma au niveau du cortex pariéto-occipital gauche est significativement corrélée à la conscience et non à la précision des réponses de ce patient.

Selon le modèle de travail neuronal global, la perception consciente serait le fruit de l'amplification en cascade du système par certains neurones. Un défaut de cette amplification ne permettrait qu'une perception non consciente (Sergent et Dehaene, 2004). Ces travaux adoptent une approche fonctionnelle de l'étude de la conscience. Il existe d'autres champs théoriques ancrés dans la vague d'étude de la conscience et notamment les nombreux travaux de Dehaene et collaborateurs. Nous ne les détaillerons pas car nous avons fait le choix de présenter uniquement les études abordant les substrats anatomiques de la conscience visuelle.

Résumé

L'Hémianopsie latérale homonyme (HLH) est une amputation du champ visuel de chaque œil, à la suite d'une atteinte post-chiasmatique. La perte de champ visuel est controlatérale à la lésion (c'est-à-dire qu'une lésion occipitale droite engendre une amputation du champ visuel gauche : HLHg, et inversement). L'HLH est le trouble visuel le plus fréquent à la suite d'une atteinte cérébrale. Celle-ci est objectivable par différents types de périmétries (Goldmann, Humphreys, Octopus...). L'étiologie la plus fréquente est l'accident vasculaire cérébral. Elle est souvent associée à des difficultés de lecture, de repérage dans l'espace, d'exploration visuo-spatiale, d'accès à l'information dans sa globalité et à l'impossibilité de conduire une automobile. Cependant il existe des capacités visuelles non conscientes au sein du champ visuel dit « aveugle ». Ces capacités ont été décrites au début du XXème siècle et appelées par Weiskrantz en 1974 « *blindsight* » pour définir l'ensemble des capacités visuelles inconscientes présentes dans le champ visuel contralésionnel. Différentes approches explicatives de ce phénomène sont proposées 1) la présence d'îlots corticaux préservés au niveau de la lésion qui permettent ce traitement, 2) la présence d'une voie sous-corticale permettant de traiter l'information d'une manière rapide et non-consciente, projetant l'information directement au niveau des régions visuelles associatives en court-circuitant le cortex visuel primaire, 3) la présence de deux connexions inter-hémisphériques (données observées chez un seul patient HLH). Un faisceau de fibres blanches traversant le splénium pour connecter le CGL d'un hémisphère à l'aire V5/MT+ de l'autre hémisphère (controlatéral). L'autre voie relie V5/MT+ des deux hémisphères *via* une connexion transcallosale.

Dans le chapitre 2 sur la reconnaissance des scènes naturelles, nous nous sommes aperçus, en se confrontant à la littérature, que celle-ci était modulée par le phénomène de spécialisation hémisphérique. Nous allons maintenant présenter les résultats d'un premier ensemble de recherche largement inspirés des travaux de Carole Peyrin, ayant pour but d'étudier la spécialisation hémisphérique concernant les fréquences spatiales, lors du traitement de scènes

naturelles dont le spectre fréquentiel a été manipulé. Mais également d'évaluer l'effet d'une consigne différente sur une même tâche visuelle.

Par conséquent nous avons eu besoin d'utiliser une méthode particulière pour filtrer nos images (explicitée dans Mermillod et *al.*, 2005, Peyrin et *al.*, 2003, voir Annexe 3). Compte tenu de la littérature, nous avons choisi d'étudier la spécialisation hémisphérique chez des sujets sains, en tenant compte de l'effet éventuel de l'âge et du sexe des participants (comme décrit lors du chapitre précédent). Afin d'étudier l'effet d'une lésion au niveau du cortex visuel primaire sur le traitement des fréquences spatiales, nous présenterons ensuite, les résultats obtenus à ce même protocole proposé cette fois à des patients atteints d'une lésion du cortex visuel primaire souffrant d'une hémianopsie latérale homonyme. Nous venons de décrire l'hémianopsie latérale homonyme et le phénomène de perception inconsciente dans le champ visuel aveugle (*blindsight*) de ces patients, lors du chapitre précédent. Mais nous n'avons pas abordé les capacités visuelles dans le champ voyant ou central des patients hémianopsiques, qui est considéré comme sain. C'est pourquoi avant de présenter nos résultats obtenus lors d'une étude comportementale évaluant les performances dans le champ visuel aveugle, il nous a semblé important de nous assurer de l'intégrité des capacités visuelles de ces patients dans le champ visuel central et le champ considéré comme sain. Ceux-ci sont présentés lors de la Partie suivante sous forme de 3 études.

PARTIE 2

Traitement des scènes visuelles : de l'approche comportementale à l'approche neuropsychologique

CHAPITRE 1 : APPROCHE EXPERIMENTALE : TRAITEMENT DES SCENES VISUELLES CHEZ DES PARTICIPANTS SAINS

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de trois études comportementales : l'une menée chez un groupe de participants sains et les deux autres menées chez des patients hémianopsiques (avec, pour chaque, un groupe contrôle de participants sains).

I. Etude 1 : Détection et catégorisation dans le champ visuel gauche, central et droit, chez des participants sains

Dans notre protocole expérimental les participants réalisaient une tâche de détection (est-ce que la cible est présente ou non à l'écran ?) ainsi qu'une tâche de catégorisation (est-ce que la cible présente à l'écran est une ville ou une forêt ?) de scènes naturelles filtrées soit passe-bas (BFs) soit passe-haut (HFs) présentées de manière latéralisée (champ visuel gauche/champ visuel droit) ou en champ central. L'idée générale était d'évaluer l'influence des processus descendants lors de la reconnaissance visuelle de scènes pour réaliser exactement la même tâche, à l'aide d'une demande cognitive (*via* la consigne) qui différait. Pour ceci nous avons enregistré la précision ainsi que les temps de réponse obtenus chez des adultes sains réalisant deux tâches exactement identiques, seule la consigne différait, impliquant une demande visuelle différente. Les stimuli utilisés étaient des scènes naturelles représentant des villes et des forêts, non filtrées, filtrées en HFS ou en BFS, présentées en champ central, gauche ou droit.

1. Résumé des résultats obtenus chez les participants sains

Les résultats mettent en évidence que les performances obtenues sont plus précises pour les scènes présentées dans le champ visuel gauche lors de la tâche de détection, et dans le champ visuel droit lors de la consigne de catégorisation. L'interaction entre les facteurs Tâche * Fréquences spatiales met en évidence un traitement *coarse-to-fine* lors de la tâche de catégorisation, ceci à la fois pour les temps de réponse et pour la précision des réponses obtenues. Concernant l'interaction entre les facteurs Tâche * Fréquences Spatiales * Champ Visuel de présentation, une spécialisation hémisphérique gauche (un avantage pour le champ visuel droit de présentation) se dessine concernant les scènes filtrées en HFS lors de la consigne de catégorisation, ceci uniquement pour la précision des réponses obtenues. Par ailleurs, un avantage du champ visuel gauche se dessine pour la tâche avec la consigne de détection concernant toutes les fréquences spatiales, à la fois pour les temps et la précision des réponses obtenues.

Ces résultats suscitent tout l'intérêt de considérer l'effet « *top-down* » de la demande visuelle d'une tâche afin de mieux comprendre l'analyse visuelle réalisé par chacun des hémisphères.

2. Problématique et méthode

Cette étude a pour objectif de comprendre comment s'opère la sélection corticale des fréquences spatiales lors de la reconnaissance visuelle de scènes en se référant à l'hypothèse de la spécialisation hémisphérique. Ainsi que l'effet *top-down* de la demande visuelle d'une tâche, en faisant varier la consigne tout en gardant la même tâche et les mêmes stimuli. Dans ce but, nous avons mené une expérience comportementale à la fois chez des adultes sains ainsi que chez des patients cérébro-lésés, en adoptant alors une approche cognitive et neuropsychologique.

Nous allons dès à présent aborder certains points méthodologiques afin de justifier le protocole expérimental utilisé ainsi que les stimuli.

L'utilisation de scènes naturelles nous a permis de manipuler trois points. Premièrement les scènes naturelles sont des stimuli complexes et « écologiques », pour lesquelles la reconnaissance demande un traitement de haut niveau cognitif.

Deuxièmement, les scènes naturelles sont des stimuli pour lesquels nous pouvons modifier le contenu en fréquences spatiales (HFS ou BFS) tout en conservant la même scène et le même contenu sémantique. Troisièmement, un protocole identique a été proposé à chaque participant, avec deux consignes différentes afin d'évaluer l'effet *top-down* de la consigne sur le traitement d'un même stimulus visuel.

Concernant la spécialisation hémisphérique, trois autres facteurs ont été contrôlés : la latéralité manuelle, l'âge et le sexe des participants. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, certaines caractéristiques de la population choisie comme la latéralité manuelle, l'âge et le sexe peuvent interférer sur les processus d'asymétrie hémisphérique. En effet certaines études (Hellige et *al.*, 1994) ont mis en évidence une moindre grande asymétrie hémisphérique chez les gauchers. De même que le sexe peut influencer cette asymétrie, avec des études qui ont mis en évidence un traitement moins latéralisé chez les femmes que chez les hommes (Voyer, 1996, Hausmann, Slabberkoorn, Van Goozen, Cohen-Kettenis, et Güntürkün, 2000). Certaines études évoquent des différences anatomiques entre hommes et femmes pour expliquer cela, et principalement au niveau du splénium du corps calleux (Allen, Richey, Chai, et Gorski, 1991), qui serait plus large chez la femme que chez l'homme. Par conséquent ces recherches postulent qu'il existe des connexions inter-hémisphériques plus soutenues chez la femme, ce qui expliquerait que l'asymétrie hémisphérique est moins marquée chez elles que chez les hommes. D'autre part, certains auteurs ont observé (Hausmann et Güntürkün, 2000, Hausmann et *al.*, 2002) des modulations fonctionnelles hémisphériques dues aux variations hormonales chez la femme, et principalement durant la période du cycle menstruel où l'asymétrie hémisphérique est plus marquée. Ils supportent cet argument avec d'autres observations chez les femmes ménopausées, chez qui l'asymétrie hémisphérique reste stable. Enfin, comme nous l'avons abordé dans la partie 1.4.2 du chapitre 2 de la PARTIE I, selon l'âge des participants la spécialisation hémisphérique est plus ou moins marquée (Dolcos et *al.*, 2002) par conséquent il faut considérer ce facteur.

Nous allons maintenant aborder les contraintes de la réponse manuelle concernant la spécialisation hémisphérique. Nous ne pouvions pas demander une réponse verbale, car celle-ci aurait engendré une activation de l'hémisphère gauche mobilisé dans les tâches de dénomination (Hellige et Sergent, 1986) ce qui pourrait par conséquent biaiser les asymétries cérébrales visuelles. De ce fait, une réponse motrice a été choisie, à l'aide d'un boîtier réponse. Nous avons demandé une réponse manuelle à nos sujets, avec la main dominante, sur un boîtier réponse placé sur le plan sagittal, afin de contrôler l'effet Simon.

Simon, (1969) a observé que les sujets donnaient de manière plus précise et plus rapide leur réponse lorsque la position du stimulus (champ visuel gauche ou droit) correspondait à la position de la réponse motrice (main gauche ou droite / index ou majeur). Afin de contrôler cet effet nous avons demandé à nos participants de donner leur réponse manuelle à l'aide d'un boîtier positionné sur le plan sagittal (et non horizontal).

Ces facteurs sont donc à prendre en compte, et à contrôler du mieux possible du fait de leur influence sur la spécialisation hémisphérique. Par conséquent, nos deux premières études ont été menées chez des participants de sexe masculin et féminin, jeunes ou âgés, droitiers et de langue maternelle française, avec un sens de lecture de gauche à droite.

Le but de cette étude est d'étudier la spécialisation hémisphérique du traitement des fréquences spatiales lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles. Une même tâche est proposée avec deux consignes différentes induisant alors deux types de traitement: un traitement de bas niveau cognitif (consigne de détection) et un traitement de haut niveau cognitif (consigne de catégorisation) dans l'objectif d'évaluer l'effet de la demande cognitive de la tâche. Les tâches sont proposées à des sujets sains, jeunes et âgés, hommes et femmes afin d'évaluer l'effet du sexe, de l'âge et de la demande cognitive de la tâche sur la spécialisation hémisphérique.

3. Partie expérimentale

3.1. Population

Le groupe d'hommes contrôles a été apparié aux patients HLH (Les résultats concernant les patients sont présentés lors de l'étude 3 ci-après), en fonction de leur âge et de leur préférence

manuelle. Ce groupe comprend 16 hommes dont 9 jeunes (âgés de 22 à 43 ans ; $m=31,8$ ans) et 7 âgés (âgés de 55 à 72 ans ; $m=62,6$ ans). Un groupe de femmes a été constitué afin de comparer la spécialisation hémisphérique selon le sexe. Ce groupe de femmes droitrières a été apparié aux hommes contrôles, il comprend 16 femmes dont 9 jeunes (âgées de 22 à 42 ans ; $m=29,9$ ans), et 7 âgées (âgées de 53 à 77ans ; $m=65,4$ ans).

3.2. Stimuli

Les stimuli utilisés dans cette expérience sont des photographies en noir et blanc, carrées (en 256 niveaux de gris, leur taille réelle est de 256 par 256 pixels) (Figure 47). Cette taille angulaire permet, en vision centrale, une présentation simultanée aux deux hémisphères cérébraux. Représentant deux scènes naturelles appartenant à une catégorie sémantique différente : ville et forêt. Elles ont une orientation dominante similaire (verticale) ainsi leur identification ne peut pas se faire sur la base de ces informations (Guyader, Chauvin, Peyrin, Hérault et Marendaz, 2004). Les stimuli sont délivrés à l'aide du logiciel E-Prime, sur un écran d'ordinateur de 17 pouces, avec une résolution de 1024 par 768 pixels, et un taux de rafraîchissement de 85Hz. L'écran est placé à 110cm du sujet, ainsi la taille angulaire des images correspond à 4° d'angle visuel. Pour chaque scène naturelle deux types d'images ont été créées, soit filtrées passe-bas (BFS) soit filtrées passe-haut (HFS). La fréquence de coupure des scènes en BFS est inférieure à 4 cycles par degrés d'angle visuel (= 16 cycles par image pour une image de 4°) pour les BFS, et celle des scènes en HFS est supérieure à 6 cycles par degrés (= 24 cycles par image pour une image de 4°) (Figure 47).

L'énergie totale des images HFS et BFS a été égalisée pour chaque scène, dans le but de créer des stimuli qui n'ont pas d'effet sur la spécialisation hémisphérique. De plus, la luminance moyenne de chaque stimulus est similaire.

La présentation des scènes peut se faire soit au centre de l'écran, soit dans le champ visuel droit (CVD), soit dans le champ visuel gauche (CVG). Lorsque la présentation est latéralisée (CVD et CVG) les bords internes ou externes du stimulus se situent respectivement à $1,5^\circ$ et à $5,5^\circ$ d'angle visuel d'excentricité rétinienne.

Nous avons utilisé 10 photographies de forêts et de villes différentes, et pour les essais dans lesquels rien n'apparaît nous avons laissé la plage neutre de l'arrière-plan de l'écran.

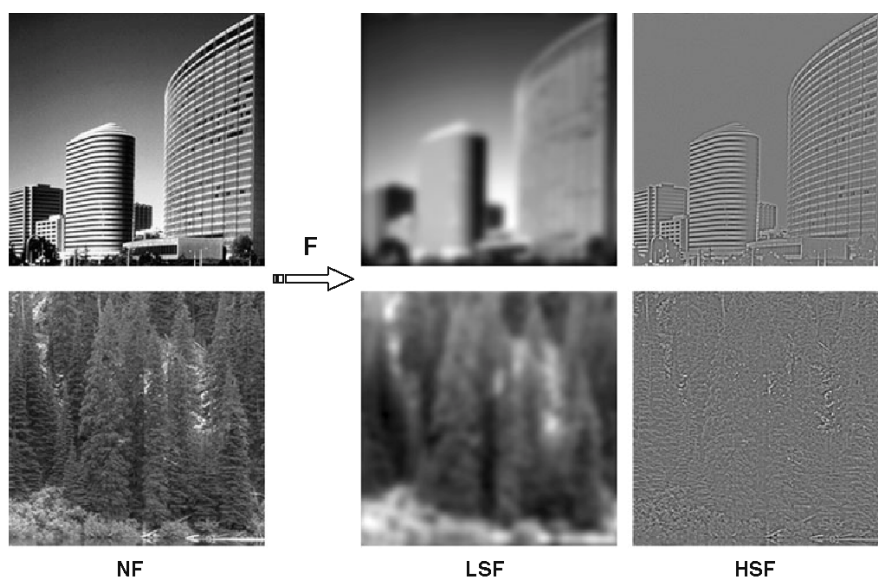


Figure 47 : Exemples de scènes naturelles utilisées dans la tâche avec soit la consigne de détection soit celle de catégorisation. Les images NF représentent respectivement une scène d'autoroute et de ville, non filtrées, les images LSF la version passe-bas des scènes (fréquence de coupure < 4 cpd) et les images HSF la version passe-haut des scènes (fréquence de coupure > 6 cpd). Les orientations dominantes de ces deux scènes sont similaires (ceci a été mis en évidence à l'aide du calcul des spectres d'amplitude).

3.3. Procédure

Les participants ont été testés à la Fondation Ophtalmologique de Rothschild. Ils ont été évalués individuellement, dans une pièce sombre et calme, leur tête est centrée sur l'écran et reste immobile (pas de mentonnière). L'ensemble du protocole a été réalisé en une seule fois par les sujets contrôles (environ 1 heure pour chaque sujet) et en 2 fois par certains patients (résultats des patients sont présentés lors de l'étude 2 et 3) présentant une grande fatigabilité (environ 1 heure et 30 minutes pour chacun d'entre eux) ; l'ordre de passation des épreuves était le même pour tous les sujets. Le sujet manipule la SRbox avec sa main dominante (Cf. consigne en annexe 1). Les réponses des sujets sont enregistrées automatiquement par le programme qui délivre les stimuli. Les variables dépendantes étudiées sont le temps de réaction pour les réponses correctes, et le taux d'erreurs commis par chacun des participants.

3.3.1. Tâche de détection

La phase d'expérimentation est précédée d'une période d'essai de 18 présentations, dont 5 scènes non-filtrées, 8 filtrées et 5 sans stimulus.

Pour chaque essai l'apparition du stimulus est précédée d'un point de fixation (dans le but de garder la direction du regard au centre de l'écran) durant 800 ms, suivi d'un son avertissant l'arrivée d'un stimulus. Le stimulus est présenté à l'écran durant 100 ms. Deux essais sont séparés par un intervalle de 2 secondes, après la réponse du sujet (Figure 48). Le sujet dispose de 2 secondes pour donner sa réponse au-delà la réponse n'est pas enregistrée.

Les stimuli (lorsque l'image apparaît à l'écran) apparaissent soit dans le CVD, CVG ou CV central. Pour chaque essai, les sujets ont pour but de juger si le stimulus (ville ou forêt) est présent quel que soit le contenu en fréquences spatiales. Chaque sujet a pour instruction de répondre le plus rapidement possible, avec sa main droite posée sur le boîtier réponse E-Prime (placé dans le plan sagittal, de façon à contrôler l'effet de la localisation de l'image à l'écran et de la main de réponse, sur l'asymétrie hémisphérique.). Il doit appuyer sur le bouton du haut avec le majeur lorsqu'il juge que rien n'est apparu et avec l'index sur le bouton du bas lorsqu'il juge qu'un stimulus est apparu à l'écran. Le temps et la précision des réponses (correcte ou incorrecte) de chaque sujet sont enregistrés.

Cette tâche de détection est constituée de 4 phases de 6 minutes environ, chaque phase contient 60 présentations soit un total de 240 présentations pour l'ensemble de la tâche (15 présentations à gauche du point de fixation / 15 présentations à droite du point de fixation / 15 présentations centrées / 15 présentations dans lesquelles rien n'apparaît).

Les stimuli apparaissent dans un ordre pseudo-aléatoire (contrôlé au niveau du nombre de réponse : il n'y a jamais plus de 4 présentations identiques à la suite).

3.3.2. Tâche de catégorisation

La phase d'expérimentation est précédée d'une période d'essai comprenant 16 présentations (dont 7 images non filtrées et 9 filtrées).

Pour chaque essai l'apparition du stimulus est précédée d'un point de fixation central durant 800 ms, suivi d'un bip sonore permettant d'avertir le sujet de l'apparition de l'image, simultanément à ce bip l'image apparaît durant 100ms, suivie d'une plage grise de réponse disparaissant avec la réponse du sujet ou au bout de 2 secondes (au-delà de ce temps la réponse du sujet n'est pas enregistrée).

Cette tâche est composée de 3 phases de 60 présentations, chaque phase est séparée par un intervalle de 2 minutes environ selon les besoins du sujet. Chaque phase dure approximativement 5 minutes. Une phase comprend 20 présentations à gauche du point de fixation, 20 présentations à droite du point de fixation et 20 présentations centrales.

Nous avons donc un total de 180 images : 90 villes et 90 forêts, dont 30 filtrées passe-haut, 30 filtrées passe-bas et 30 neutres. Il y a 60 images différentes ($2 \text{ catégories} * 10 \text{ images} * 3 \text{ résolutions}$) pouvant apparaître chacune à 3 positions différentes (centre, gauche, droite).

Pour chaque essai, les sujets ont pour but de juger si le stimulus est une ville ou une forêt quel que soit le contenu en fréquences spatiales.

Chaque sujet a pour instruction de répondre le plus rapidement possible, avec sa main droite posée sur le boîtier réponse E-Prime (placé sur le plan sagittal, de façon à contrôler l'effet de la localisation de l'image à l'écran et de la main de réponse, sur l'asymétrie hémisphérique.). Il doit appuyer sur le bouton du haut avec le majeur lorsqu'il juge que l'image représente une forêt et avec l'index sur le bouton du bas lorsqu'il juge que le stimulus apparu à l'écran est une ville.

Les stimuli apparaissent dans un ordre pseudo-aléatoire (contrôlé au niveau du nombre de réponse : il n'y a jamais plus de 4 présentations identiques à la suite).

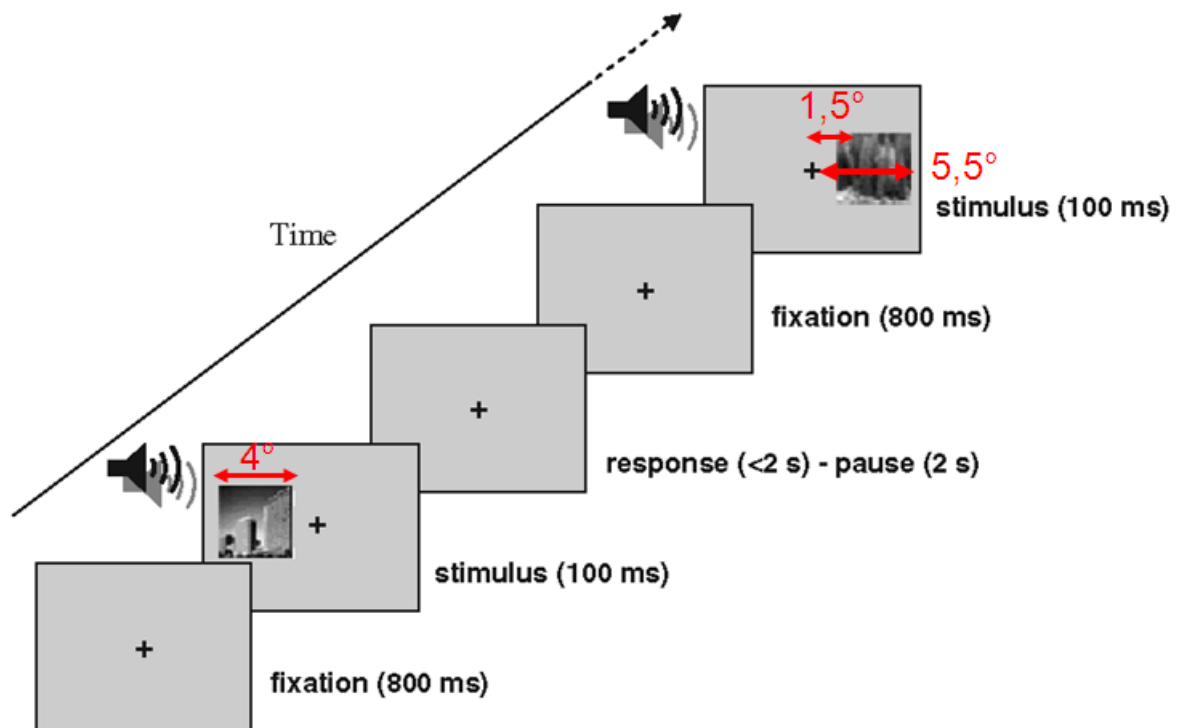


Figure 48 : Figure illustrant la procédure d'un essai expérimental. Le point de fixation apparaît à l'écran durant 800ms puis suivi du stimulus (100ms) apparaissant simultanément avec un bip sonore. Suivi d'un temps de réponse de 2000ms et enfin suivi d'un autre point de fixation d'un autre essai. La même procédure a été utilisée pour la tâche de détection et de catégorisation.

3.4. Plan expérimental et hypothèses opérationnelles

3.4.1. Plan expérimental

Le temps de réaction des réponses correctes (en ms) et le taux d'erreurs (100 - taux de réponses correctes) de chaque sujet sont enregistrés. L'analyse statistique porte sur ces deux variables dépendantes en suivant le plan expérimental suivant :

$$\underline{S}_n < G_3 * X_2 * A_2 > * TS_2 * FS_3 * CV_3$$

- S (sujets) : N=32

- G₁, (groupes) : g₁= contrôles

- X₂, (sexe) : x1=homme/x2=femme
- A₂, (âge) : a1=jeunes (<43 ans), a2=âgés (>55 ans)
- TS₂, (type de scène) : ts1=ville, ts2=forêt
- FS₃, (fréquence spatiale) : fs1=non filtrée, fs2=basse FS, fs3=haute FS
- CV₃, (champ visuel) : cv1=centre, cv2=gauche, cv3=droit

3.4.2. Objectifs théoriques, et hypothèses opérationnelles

Cette étude 1 présente les résultats comportementaux obtenus lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles dans les champs visuels latéralisés (gauche et droit) et central, chez des sujets sains. Cette étude comportementale a pour but d'étudier chez les sujets sains la spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales lors de la reconnaissance de scènes naturelles. Nous mesurons alors, la précision des réponses ainsi que la vitesse de traitement (temps de réponse enregistrés) afin d'explorer l'effet de l'âge et du sexe sur cette spécialisation hémisphérique. Concernant l'effet du sexe nous avons évoqué précédemment que les résultats observés chez l'homme montrent une plus grande latéralisation que chez la femme pour des fonctions telles que le langage (Baxter et *al.*, 2003 ; Rossell et *al.*, 2002) et les capacités visuo-spatiales (Corballis et Sidey, 1993 ; Hausmann et Gunturkun, 1999). Les femmes auraient un mode de fonctionnement cérébral moins latéralisé et particulièrement en dehors de la période de cycles menstruels qui induisent des changements hormonaux important influençant de manière considérable les asymétries cérébrales. Peyrin et *al.* (2006) ont montré à l'aide d'une tâche de reconnaissance de scènes naturelles une plus grande spécialisation hémisphérique chez les hommes que chez les femmes lors du traitement des fréquences spatiales.

Par conséquent nous nous attendons à obtenir le même pattern de résultats avec notre protocole. De plus, aux vues des résultats obtenus par Cabeza et *al.* (2002) ainsi que de leur modèle HAROLD sur l'effet de l'âge, nous nous attendons à ce que la spécialisation hémisphérique soit moins marquée chez nos sujets âgés par rapport à nos sujets jeunes

(Cabeza et *al.*, 2002). Cette étude a pour but également d'étudier l'effet de la consigne (détection vs catégorisation) sur le traitement visuel. Notre objectif est également d'explorer l'effet de l'interaction entre les fréquences spatiales contenues dans nos scènes naturelles et la complexité de la tâche induite par la consigne. En effet nous proposons une tâche de détection et une tâche de catégorisation de scènes naturelles. La catégorisation est décrite dans la littérature comme la capacité à distinguer des attributs physiques et ainsi de pouvoir créer des catégories d'objets similaires, contenant des attributs proches (Rosch, 1978) ; permettant de simplifier le monde qui nous entoure. La tâche expérimentale de catégorisation implique donc d'attribuer un exemplaire à sa catégorie respective. La détection est un processus de plus bas niveau cognitif, qui nécessite le simple fait de détecter, de décider de la présence ou non d'un objet à l'écran. Nous nous attendons alors, à un traitement *coarse-to-fine* lors de la tâche de catégorisation, se traduisant par des performances plus lentes au niveau des temps de réaction, et plus d'erreurs au niveau de la précision des réponses pour les HFS par rapport aux BFS et aux NF. En revanche, pour la tâche de détection nous nous attendons à ce que ce phénomène de traitement *coarse-to-fine* disparaisse. Enfin le dernier objectif de cette étude, est de vérifier la présence de l'interaction entre le champ visuel de présentation (gauche, droit, central) des scènes naturelles, et la tâche (détection vs catégorisation). En effet, la voie magnocellulaire prenant naissance au niveau des cellules ganglionnaires de la rétine, encode les informations venant de la vision extra-fovéale, alors que la voie parvocellulaire provient de la rétine fovéale et par conséquent est impliquée dans l'analyse visuelle fine (Martin, Grunert, 2003). La voie magnocellulaire, par ses projections sous-corticales vers les colliculi, devrait être suffisante pour une simple détection de stimuli (Vuilleumier et *al.*, 2003). Nous nous attendons à ce que les performances obtenues lors de la tâche de catégorisation soient meilleures en vision centrale (fovéale) que lors de la présentation latéralisée des scènes dans le champ visuel gauche et droit (extra-fovéale) confirmant les résultats observés par (Fize et *al.*, 2005) en champ central et par Thorpe et *al.* (2001) en champ périphérique. En revanche, les performances obtenues pour la tâche de détection devront montrer un moins grand effet de l'excentricité des scènes.

Nous nous attendons à un effet de la tâche (induit par la consigne) avec des performances différentes pour la détection et la catégorisation, principalement pour les temps de réponse.

a. Tâche de détection

- Est-ce que l'effet de la présence (ou absence) de la cible a une incidence sur la détection des sujets contrôles ? Cette analyse se fera selon le plan suivant $\underline{S_n} < X_2 * A_2 > * C_2$

- Est-ce que les sujets sains détectent plus rapidement les BFS que les HFS ? On peut se demander également, si l'âge a un effet sur le temps et la précision des performances dans cette tâche de détection ?

Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant $\underline{S_n} < X_2 * A_2 > * TS_2 * FS_3 * CV_3$, chez les sujets jeunes, comprenant 9 hommes de moins de 43 ans et 8 femmes de moins de 42 ans ; et chez les âgés, comprenant 7 hommes de plus de 55 ans, et 7 femmes de plus de 53 ans.

On s'attend à ce que le temps de réponse soit plus rapide pour détecter les BFS que les HFS, et à ce que l'âge ait un effet sur le temps de réponse.

b. Tâche de catégorisation

- Retrouve-t-on une spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales chez les normaux, c'est-à-dire les HFS traitées préférentiellement par l'hémisphère gauche (HG) et les BFS par l'hémisphère droit (HD), et ceci particulièrement chez les hommes jeunes ?

- Existe-t-il un effet de l'âge sur les processus de traitement des fréquences spatiales ?

- Enfin on peut se demander si le sexe a un effet sur les processus de traitement des fréquences spatiales ?

Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant : $\underline{S_n} * TS_2 * FS_3 * CV_3$, chez 9 hommes jeunes, 9 femmes jeunes et 7 hommes âgés.

On s'attend à ce que chez les hommes jeunes, les HFS soient traitées préférentiellement par l'HG dans le CV D et les BFS par l'HD dans le CV G.

On s'attend à ce que les hommes âgés présentent une spécialisation hémisphérique pour les fréquences spatiales moins marquée que les jeunes.

On s'attend à ce que les femmes jeunes ne présentent pas le même profil de performances que les hommes jeunes, c'est-à-dire une spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales moins marquée.

Les résultats de cette première étude menée chez les participants sains sont présentés ci-après sous-forme d'article [Article 1]. A la suite de celui-ci sont exposés les résultats des deux autres études similaires menées chez les patients hémianopsiques.

Article 1

Visual demand and visual field presentation influence natural scene processing

Olivier A. Coubard · Céline Perez · Seta Kazandjian ·
Isabelle Gaudry · Christian Marendaz ·
Nathalie Guyader · Carole Peyrin · Sylvie Chokron

Received: 24 February 2010 / Revised: 18 May 2010 / Accepted: 4 July 2010
© Springer-Verlag 2010

Abstract

Background Bottom-up and top-down processes are involved in visual analysis of scenes. Here we examined the influence of top-down visual demand on natural scene processing.

Methods We measured accuracy and response time in adults performing two stimuli-equivalent tasks. Unfiltered, low or high spatial frequency (SF) natural scenes were presented in central, left, or right visual fields (CVF, LVF, RVF). The tasks differed only by the instructed visual demand. In the detection task, participants had to decide whether a scene was present or not. In the categorization task, they had to decide whether the scene was a city or a forest.

Results Higher accuracy was seen for the LVF in the detection task, but for categorization, greater accuracy was seen for the RVF. The interaction between Task and SF revealed coarse-to-fine processing in the categorization task for both accuracy and reaction time, which nearly disappeared in the detection task.

Considering the interaction of Task, VF and SF, a left-hemisphere specialisation (i.e., RVF advantage) was observed for the categorisation of HSF scenes for accuracy alone, whereas a LVF advantage was seen for all SFs in the detection task for both accuracy and reaction time.

Conclusion Our results revealed that the nature of top-down visual demand is essential to understanding how visual analysis is achieved in each hemisphere. Moreover, this study examining the effects of visual demand, visual field presentation, and SF content of stimuli through the use of ecological stimuli provides a tool to enrich the clinical examination of visual and neurovisual patients.

Keywords Vision · Detection · Categorization · Visual asymmetry · Natural scenes

O. A. Coubard (✉) · C. Perez · S. Kazandjian · I. Gaudry ·
C. Marendaz · C. Peyrin · S. Chokron
ERT TREAT Vision & Laboratoire de Psychologie et
NeuroCognition,
UMR 5105 CNRS-Université Pierre Mendès France,
1251 avenue Centrale,
38040 Grenoble, France
e-mail: olivier.coubard@gmail.com

C. Perez · I. Gaudry · S. Chokron
Service de Neurologie,
Fondation Ophtalmologique Adolphe de Rothschild,
25 rue Manin,
75019 Paris, France

N. Guyader
Grenoble-Image-Parole-Signal-Automatique (Gipsa)- lab,
Département Images-Signal,
Institut National Polytechnique de Grenoble,
46 avenue Félix Viallet,
38031 Grenoble, France

Introduction

Visual analysis of a scene is achieved through bottom-up and top-down processes. The former is determined by the physical characteristics of the scene and the biological constraints of the visual system. The latter obeys more fluid factors, such as the instruction methods, goals, strategies, and motivation. Based on psychophysical data [1–3] and on the neuroanatomy of magnocellular and parvocellular pathways [4], bottom-up models of visual recognition have suggested that the visual analysis of a scene begins with a parallel extraction of elementary attributes of different spatial frequencies [5, 6]. Specifically, low spatial frequencies (LSF) are conveyed by the magnocellular pathway, which subserves an expedient and raw estimate of the visual scene by projecting to the subcortical collicular-pulvinar system, and to the cortical dorsal parietal stream [7], as well as temporal [8] and frontal [5] regions of the brain. In a parallel but slower process, this

rapid and rough perceptual analysis can be refined by high spatial frequencies (HSF) conveyed by the parvocellular pathway projecting to the primary visual cortex and the cortical ventral stream [9]. As a consequence of the different conduction rates of magnocellular and parvocellular pathways, visual analysis proceeds in a coarse-to-fine sequence [1, 3, 10]. However, this processing sequence has been shown to be top-down biased and influenced by expertise, context or instruction [11, 12].

The present study examined how visual demand may also influence the processing of natural scenes. To achieve this goal, we invited healthy adults to undergo two stimuli-equivalent tasks differing only by the instruction received for each task: a detection task and a categorization task. In the detection task, participants were instructed to simply detect the presence of a scene. In the categorization task, they had to attribute each scene exemplar to its corresponding category: cities versus forests.

The first goal of the study was to examine how visual demand may interact with the spatial location of the scene. Scenes were presented in the left, central, or right visual field (LVF, CVF, and RVF respectively). From a bottom-up perspective, expectations can be drawn up from the constraints of the visual system itself. The magnocellular pathway originates in retina ganglion cells encoding information from extrafoveal vision [13]. Through its projections onto the visual collicular system, the magnocellular pathway might be sufficient for detecting a stimulus regardless of its content, as evidenced by animal lesion studies [14] or functional brain imaging studies in humans [15]. Thus, detection should be performed equally well across visual fields. In contrast, the parvocellular pathway originates in foveal retina, resulting in fine and discriminative visual analysis [13]. Consequently, and in line with prior reports [16], categorization might be better performed in foveal (central) than extrafoveal (left and right) vision. From a top-down point of view, the cognitive processes associated with the demanded task may direct the cerebral hemisphere that will process the natural scenes. Simple detection acting as a basic visuospatial task may preferentially engage the right hemisphere (of our right-handed participants), thus facilitating the processing of scenes appearing in the left visual field or in both sides [17, 18]. In contrast, categorization should engage the left hemisphere, which is dominant for linguistic functions, and has traditionally been shown to deal with semantic processes [19]. As an example in the field of memory, episodic retrieval is associated with right prefrontal activation, whereas semantic retrieval shows activation of the left prefrontal cortex [20].

The second goal was to examine how the visual demand may interact with the spatial frequency content of the scene, which was either unfiltered, low- or high-pass filtered. In

the categorization task, a coarse-to-fine sequence is expected as a result of lower accuracy and speed of processing for HSF scenes compared to LSF scenes [10], for which performance should approximate that of unfiltered stimuli. In contrast for detection (not requiring discrimination), the coarse-to-fine phenomenon should be reduced or even disappear.

Finally, we sought to examine how the visual demand would interact with both the spatial location and the spatial frequency content of the scenes. Psychophysical research using basic stimuli have evidenced a hemispheric specialization for the processing of spatial frequencies [21, 22]: the right/left hemispheres (corresponding to left/right visual fields) would be advantaged for LSF/HSF processing respectively. Extending stimuli to natural scenes, Peyrin et al. [23] corroborated this hemispheric specialization in healthy humans performing a categorization task. In a functional MRI study involving a recognition task of natural scenes, Peyrin et al. [24] further demonstrated that the dominance of the right hemisphere for rough visual estimation through LSF analysis and that of the left hemisphere for HSF fine image details occurs from the early visual areas. Here we expected to retrieve such a pattern in our categorization task, whereas detection should show less interaction with both the spatial location and the spatial frequency content of the scenes.

By examining the effects of visual demand, visual field presentation, and spatial frequency content of stimuli in a normal population, this study provides a baseline to examine visual and neurovisual disorders in addition to clinical tests [25, 26].

Material and methods

Participants

Thirty-two volunteers (16 women and 16 men) aged 45.6 (Mean) \pm 18.3 (SD) years (range = 22.0–77.2 years) gave their consent to participate in the study. Participants had 12.4 \pm 3.2 years of education, and were right-handed at 100.0% (Median) (Q1–Q3=81.8–100%) according to the Edinburgh Handedness Inventory (100% indicating absolute right-handedness) [27]. They all had normal or corrected-to-normal vision, and were naive to the purpose of the experiment.

Material

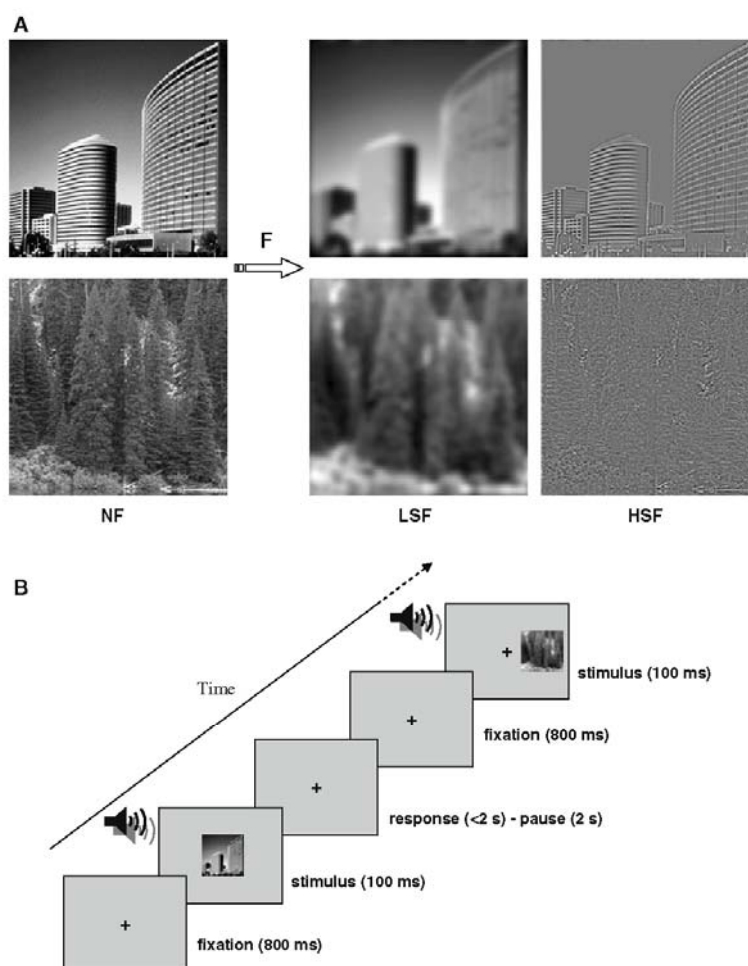
Stimuli were ten city and ten forest, black-and-white photographs (256*256 pixels, 256 grey-scales) selected from the database of natural scene images of the Computational Visual Cognition Laboratory (<http://cvcl.mit.edu/>)

database.htm). From each natural scene, two further stimuli were created: one LSF- and one HSF-filtered scene (see Fig. 1a). Spatial frequency content of scenes was filtered by multiplying the Fourier transform of original images by Gaussian filters, whose standard deviation was a function of the spatial frequency cut-off, for a standard attenuation of 3 dB. We removed the spatial frequency content above 4 cycles per degree of visual angle (i.e., low-pass cut-off of 16 cycles per image) for LSF scenes, and below 6 cycles per degree of visual angle (i.e., high-pass cut-off of 24 cycles per image) for HSF scenes.

Stimuli were displayed on a 17-inch computer monitor (1024*768-pixels definition, 85-Hz refresh rate) using

E-Prime 1.1 software (Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA, USA). Stimuli covered 4° of visual angle, and appeared either centrally (left and right edges at $\pm 2^\circ$) or 3.5° laterally in the left or right visual field (nasal and temporal edges at ± 1.5 and $\pm 5.5^\circ$ respectively). The close eccentricity of lateral stimuli produced an overlapping with central stimuli by 0.5°, which has also been used by others (e.g., [16]). Such a spatial arrangement of stimuli had the advantage of minimizing the occurrence of express saccades to lateral scenes [28] (see Procedure). We used a Serial Response Box (Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA, USA) for manual response. Response time was measured to the nearest millisecond.

Fig. 1 **a** Two examples of natural scene photographs of a city (top) and a forest (bottom). Each image was either unfiltered (NF) or filtered (F) to create a low spatial frequency (LSF) and a high spatial frequency (HSF) corresponding image. **b** Time course of a trial. After a 800-ms period of fixation, the stimulus appeared for 100 ms either in the central or left or right visual field. In this example, the first stimulus is an unfiltered city flashed in the centre, the second one is a LSF forest flashed in the right visual field. A sound occurred simultaneously with target appearance. Then, up to 2 s were dedicated to the participant's manual response. Finally, a 2-s rest period was introduced before the next trial



Procedure

The experiment was conducted in a darkened room. The luminance of the background was 0 cd.m^{-2} . The centre of the screen was adjusted to eye level, at a viewing distance of 1 m. Each trial lasted up to 4.9s. First, a fixation cross appeared for 800 ms. A sound intended to maintain vigilance was presented simultaneously with the stimulus, which was displayed for 100 ms, centrally or in the left or right visual field. Participants had up to 2s to respond manually. A 2-s rest period was introduced before the next trial (see Fig. 1b).

Visual exposure of the stimulus was set to 100 ms since our purpose was to extend this study from normal participants to populations suffering from visual or neurovisual disorders. A pilot study in hemianopic patients had shown that the task was too difficult when using scenes visible for less than 100 ms. One could argue that an oculomotor bias may occur using this procedure, which we would be unable to control as eye movements were not recorded. It is indeed true that humans are capable of eye movement with latencies of 80–120 ms [29]. However, such short-latency eye movements are elicited when a temporal gap is introduced between the extinction of the fixation point and the appearance of the target [30]. In our experiment, lateral scenes overlapped with the permanently visible fixation cross, resulting in a procedure more likely to elicit eye movements with latencies over 200 ms [31]. Taken together with close eccentricity of lateral stimuli [28], our design minimized the probability of the occurrence of eye movements during the exposure of these stimuli. Finally, participants were trained to fixate on the cross, and the examiner controlled their ocular fixation throughout the experiment.

Each participant performed two tasks. In the detection task, the stimulus could be a scene or nothing, and participants had to decide whether the stimulus (a city or a forest) was present or not, regardless of its spatial location and the spatial frequency content of the image when present. In the categorization task, the stimulus was always a scene and participants had to decide whether it was a city or a forest, regardless of its spatial location and spatial frequency content. The detection task always preceded the categorization task to make the experiment easier for future comparable studies with patients, particularly to avoid the tendency to categorize in the detection task. Participants responded by a two-button press with their right hand. The response box was oriented on a sagittal plane to prevent the Simon effect [32]. Participants were instructed to respond as quickly and as accurately as possible.

Design

Participants completed 36 experimental conditions: 2 tasks (detection and categorization) * 3 visual fields (center, left or right visual field) * 3 spatial frequencies (unfiltered, LSF

or HSF) * 2 types of scene (city or forest). There were ten trials per experimental condition, resulting in 180 trials (10 trials * 3 visual fields * 3 spatial frequencies * 2 types of scene) in the categorization task, and 240 trials in the detection task (180 target trials + 60 no-target trials). Thus, in the detection task, the probability of occurrence of a scene or no scene at all was .75 and .25 respectively. In the categorization task, the probability of occurrence of a city or a forest was .50. Trials were distributed in four and three blocks of 60 trials in the detection and categorization tasks respectively. Within a block, the different stimuli were interleaved and the order of trials was pseudo-random, i.e., no more than four consecutive trials presented the same image with the same filtering [33].

Data analysis

We analyzed the mean error rates (mER) in percentage, and the mean reaction times (mRT) for the correct responses in milliseconds. We also analyzed variability of RT, measured by the standard deviation of RT (SD of RT) for each participant. RT started at the appearance of the target. For all measures, we conducted ANOVAs with the task, the visual field, and the spatial frequency as within-participant factors. We used Newman-Keuls calculation for post-hoc comparisons. Friedman ANOVA and non-parametric post-hoc comparisons (i.e., between-group difference of sums of ranks (diff_{SR}) was compared to a threshold defined as $z_{\alpha/(k-1)/2} \sqrt{(Nk(k+1)/6)}$, where k is the number of groups) were applied on d' values in the detection task [34]. Within the detection task, we used the Student's t -test to compare the averaged target conditions and the no-target condition. Distributional information is given by standard errors.

Results

Main effects of task, visual field, and spatial frequency

The ANOVAs showed a main effect of task, visual field, and spatial frequency for both the mER [$F(1,28)=29.0$, $p<.0001$; $F(2,56)=5.47$, $p<.01$; $F(2,56)=20.7$, $p<.000001$ respectively] and the mRT [$F(1,27)=122.0$, $p<.000001$; $F(2,54)=42.0$, $p<.000001$; $F(2,54)=40.4$, $p<.000001$ respectively]. For the mSD of RT, a main effect was found for the task [$F(1,26)=18.7$, $p<.001$] and the spatial frequency [$F(2,52)=16.7$, $p<.00001$], but not for the visual field [$F(2,52)=2.02$, $p>.05$].

The detection task yielded a lower mER than did the categorization task ($1.4\pm0.7\%$ vs $3.9\pm1.7\%$), as well as a shorter mRT (466 ± 14 ms vs 622 ± 29 ms) and a shorter mSD of RT (94 ± 8 ms vs 135 ± 16 ms). Within the detection

task, performance in the averaged target conditions as compared with the no-target condition was more accurate [mER=1.4±0.3% and 3.5±0.8% for target and no-target trials respectively, $t(31)=2.89$, $p<.01$], faster [mRT=466±12 ms vs 553±19 ms, $t(31)=5.84$, $p<.00001$] and less variable [mSD of RT=94±4 ms vs 115±5 ms, $t(30)=3.48$, $p<.01$]

The main effect of the visual field for accuracy was due to a better performance in the CVF (2.0±1.0%) compared to the LVF (2.7±1.6%, NK, $p<.05$) and the RVF (3.2±1.2%, NK, $p<.01$), left and right visual fields not being different (NK, $p>.05$). For the mRT, the effect of visual field was due to lower values in the LVF (535±28 ms) and the CVF (531±26 ms, NK, $p>.05$), as compared to that in the RVF (566±27 ms, NK, $p<.001$).

The main effect of the spatial frequency was the result of a higher mER for HSF stimuli (4.7±1.9%, NK, $p<.001$) than for LSF and unfiltered stimuli (1.6±0.8% for both, NK, $p>.05$), and of an unfiltered–LSF–HSF hierarchy for both the mRT (513±20 ms, 533±22 ms, and 586±34 ms respectively) and the SD of RT (100±11 ms, 113±13 ms, and 130±14 ms respectively) (for both measures, NK, $p<.05$ between unfiltered and LSF stimuli, $p<.001$ between unfiltered/LSF and HSF stimuli).

Task*visual field interaction

The task*visual field interaction was significant for the mER [F(2,56)=9.69, $p<.001$] and the mRT [F(2,54)=28.3, $p<.000001$], and for the mSD of RT [F(2,52)=3.66, $p<.05$], as illustrated in Fig. 2.

Interestingly for accuracy, the two tasks exhibited an opposite pattern. In the detection task, the mER in the RVF was higher (2.6±1.0%, $p<.01$) than those in the CVF (1.0±0.6%) and in the LVF (0.5±0.4%; and no difference between CVF and LVF). The reverse was found in the categorization task: the mER in the LVF (4.9±2.2%) was higher than those in the CVF (3.1±1.3%, $p<.01$) and in the RVF (3.9±1.4%, $p<.05$; and no difference between CVF and RVF) (see Fig. 2a). In the detection task, we calculated d' values for further confirmation; recall that the higher the d' , the higher the perceptive ability or the easiness of the task. Friedman ANOVA on d' values corroborated the visual field effect in the detection task ($\chi^2_{(2)}=14.7$, $p<.001$): d' in the RVF (4.8±0.2) was significantly lower than that in the CVF (5.4±0.2, $\text{diff}_{\text{SR}}=18>\text{Th}$) and in the LVF (5.6±0.2, $\text{diff}_{\text{SR}}=22.5>\text{Th}$), while there was no difference between the left and the central visual fields ($\text{diff}_{\text{SR}}=4.5<\text{Th}$).

With respect to response times, the mRT in CVF (603±28 ms) was significantly shorter than those in peripheral left (630±29 ms; $p<.001$) and right visual fields (635±31 ms; $p<.001$) in the categorization task. In line with accuracy, the detection task showed increasing RTs from left to right: the mRT in the LVF (440±14 ms) was shorter than that in

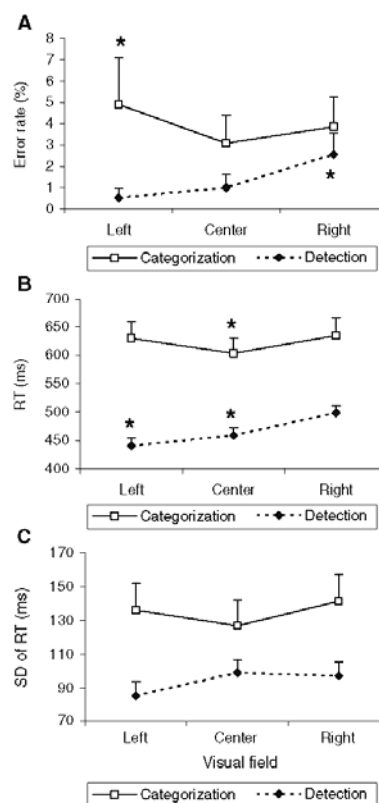


Fig. 2 Task*visual field interaction. **a** Mean error rates in percentage, **b** mean reaction times (RT) in milliseconds, and **c** mean standard deviations (SD) of RT in milliseconds, for the group of participants. Results are shown separately for the detection task (dotted line) and the categorization task (full line) for the different visual fields in the X axis. Vertical bars are standard errors. Asterisks emphasize significant difference between visual field conditions within a task

the CVF (458±14 ms, $p<.001$), which was itself shorter than that in the RVF (498±13 ms, $p<.001$) (see Fig. 2b). Finally, variability of response times in the categorization task tended to be shorter in the center (mSD of RT=127±15 ms) than in the periphery (136±16 ms and 141±16 ms in the left and right visual fields respectively), but differences failed to reach significance. The same way, no difference was found between visual fields in the detection task (see Fig. 2c).

Task*spatial frequency interaction

The interaction between the task and the spatial frequency was significant for the mER [F(2,56)=10.4, $p<.001$], the

mRT [$F(2,54)=19.6$, $p<.000001$] and the mSD of RT [$F(2,52)=4.55$, $p<.05$], as shown in Fig. 3.

In the detection task, performance did not differ according to the different filtering conditions for accuracy and variability of response times (see Fig. 3a,c respectively). Only the mRT of HSF stimuli (489 ± 16 ms) was significantly higher than that of LSF stimuli (456 ± 13 ms, $p<.001$) and of unfiltered stimuli (452 ± 13 ms, $p<.001$) (see Fig. 3b).

In the categorization task, the interaction for accuracy was only due to the mER of HSF stimuli ($7.4\pm2.5\%$), which was significantly higher than that of LSF ($2.3\pm0.1\%$, $p<.001$) and of unfiltered stimuli ($2.1\pm0.9\%$, $p<.001$) (see Fig. 3a). With

regard to response times, we observed a systematic pattern for both the mean and variability, namely an unfiltered–LSF–HSF hierarchy for the mRT (574 ± 21 ms, 610 ± 22 ms, 684 ± 39 ms for unfiltered, LSF and HSF stimuli respectively; $p<.001$) and the mSD of RT (112 ± 13 ms, 135 ± 16 ms, 157 ± 17 ms respectively; $p<.01$).

Task*visual field*spatial frequency interaction

Finally, the interaction between the task, the visual field and the spatial frequency was significant for the mER [$F(4,112)=4.72$, $p<.01$], the mRT [$F(4,108)=6.48$, $p<.001$], and the mSD of RT [$F(4,104)=2.65$, $p<.05$], as illustrated in Fig. 4.

In the categorization task, LSF stimuli yielded a shorter mRT in the LVF (608 ± 24 ms) than in the RVF (619 ± 21 ms), but the difference failed to reach significance (Fig. 4b, left). Both the mER and the mSD of RT failed to contrast left and right visual fields for LSF stimuli (Fig. 4a,c, left). For HSF stimuli, better processing in the RVF was observed for the mER: $7.3\pm1.9\%$ in the RVF against $9.7\pm3.4\%$ in the LVF ($p<.001$) (Fig. 4a, middle). Nevertheless, both the mRT and the mSD of RT were similar in the left and the right visual fields (Fig. 4b,c,middle).

In the detection task, we observed the previously described increasing mER, mRT and mSD of RT from left to right visual fields (see Fig. 4).

Additional analyses

To assess practice effects, we conducted an ANOVA with the block of trials as a within-participant factor. We found a block effect for the detection task but only for the mER ($F(3,87)=4.90$, $p<.01$), as a result of a decrease in the error rate between blocks 1–2 and 3–4. For categorization, there was no significant effect of block for the mER ($F(2,58)=1.27$, $p>.05$), the mRT ($F<1$) and the SD of RT ($F(2,58)=2.95$, $p>.05$).

Previous studies suggested that men and young adults were more lateralized than women and aged adults respectively, for several cognitive functions including visuospatial functions [33, 35]. Thus, we conducted a control analysis in which we separately measured the performance of women vs men and of young vs aged adults to further investigate the hemispheric specialization for the processing of spatial frequencies. This resulted in four groups: nine women aged 22.8–41.7 years, nine men aged 22.0–43.1 yrs, seven women aged 53.8–77.2 yrs, and seven men aged 55.4–72.5 yrs (level of education and handedness were not different between the groups). In men, the mRT for LSF stimuli tended to be shorter in the LVF, but the difference was not statistically significant ($p>.05$). For HSF stimuli, both the mRT and the mSD of RT tended to be shorter in the RVF, but the difference failed to reach statistical significance ($p>.05$). In

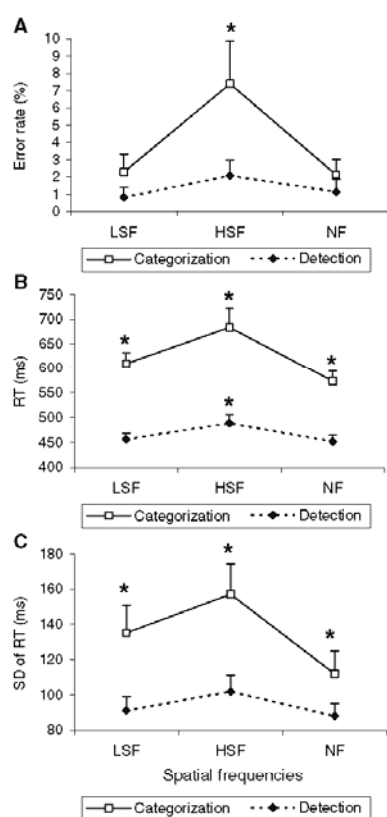


Fig. 3 Task*spatial frequency interaction. **a** Mean error rates in percentage, **b** mean reaction times (RT) in milliseconds, and **c** mean standard deviations (SD) of RT in milliseconds, for the group of participants. Results are shown separately for the detection task (dotted line) and the categorization task (full line) for the different spatial frequencies in the X axis (LSF, low spatial frequency; HSF, high spatial frequency; NF, unfiltered stimuli). Vertical bars are standard errors. Asterisks emphasize significant difference between spatial frequency conditions within a task

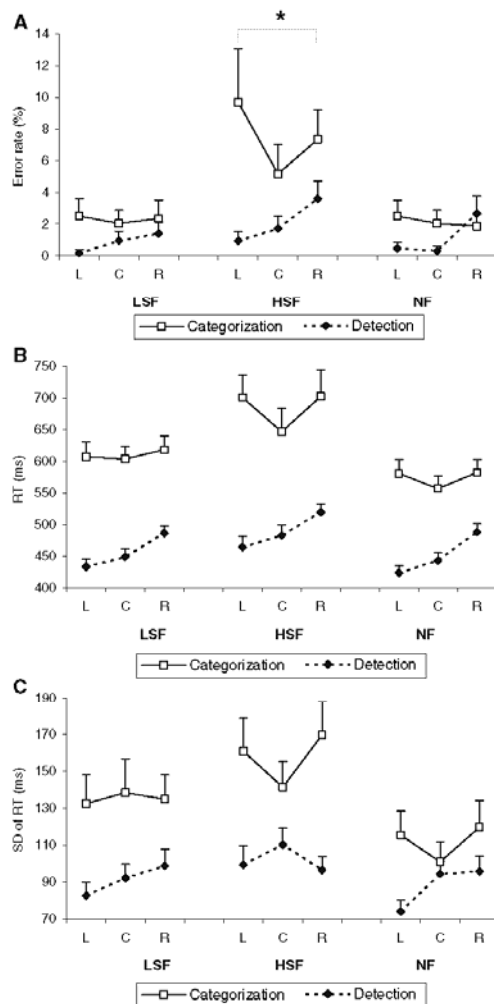


Fig. 4 Task*visual field*spatial frequency interaction. **a** Mean error rates in percentage, **b** mean reaction times (RT) in milliseconds, and **c** mean standard deviations (SD) of RT in milliseconds, for the group of participants. Results are shown separately for the detection task (dotted line) and the categorization task (full line) for the different visual fields (L, left; C, center; R, right) and spatial frequencies (LSF, low spatial frequency; HSF, high spatial frequency; NF, unfiltered stimuli) in the X axis. Vertical bars are standard errors. The asterisk emphasizes significant difference between left and right visual field conditions in the categorization task

young adults, all measures for LSF stimuli tended to be shorter in the LVF, but the difference between the two visual fields was not statistically significant ($p > .05$). For HSF stimuli in the RVF, we observed an advantage for the mRT

and the mSD of RT, but differences failed to reach significance ($p > .05$).

Discussion

Our results indicate that the processing of natural scenes depends on the visual demand specified in the instructions given to the participant. The main finding of this study was that the task significantly interacted with both the visual field of presentation and the spatial frequency content of the scene. In the following sections, we start with a comment on the task effect and related methodological issues, before entering the core of the discussion on the interaction between the task and other experimental factors.

Categorization revealed an extra processing time of 33% over all conditions as compared to detection (mRT of 622 ms vs 466 ms respectively). The lower probability of target occurrence in the categorization task (50%) compared to the detection task (75%) may have caused shorter response time in the latter. Nevertheless, a recent study also comparing categorization and detection of natural scenes with equivalent probability of target occurrence (60%) showed an extra time of 24% [36], corroborating that most additional time in the present study was due to the categorizing cost. Second, no-target trials within the detection task yielded a higher error rate (+2.2%), mean response time (+87 ms) and variability of RT (+21 ms) than did target trials. This result is reminiscent with visual search studies in which target trials require half the processing time as compared to no-target trials, since the search command stops as soon as the target is found in the former, while the latter requires an exhaustive exploration of the visual field [37]. We suggest that a similar processing occurred in our detection task, in the absence of eye movements. Indeed, further errors, time and variability in no-target trials might correspond to a genuine supplementary processing, consistent with studies in humans showing that brain activity is stronger in no-target (distracter) trials than in target trials as evidenced by ERP [38] or fMRI [16] studies. A final point that needs methodological discussion is that we used ten original images for each category, which were seen 18 times by every participant. One could argue that this design may have led to repetition and putative improvements of performance in later blocks. The absence of block effects in the categorization task for all measures showed that our participants did categorize, although they may have recognized the images. We now discuss the motivated issues and main findings of this study.

Our general purpose was to examine the influence of visual demand on natural scene processing. Specifically, we aimed at exploring the effects of simply changing the instructions given to a participant on his/her performance in

visually analyzing natural scenes. Such a design was expected to induce two types of processes. On the one hand, detection is the process of finding out the existence of a body or a hidden phenomenon; experimentally, it requires deciding on the presence of an object. On the other hand, categorization is the semantic process of discretizing (i.e., segregating) physical reality by creating or referring to classes containing objects of similar nature; experimentally, it asks participants to attribute exemplars to their corresponding categories. Though these two processes may share a common visuospatial mechanism, they are also believed to involve specific neural networks [39].

The first issue of this study concerns the interaction between the visual demand (the task) and the visual field of presentation (left, central or right). For the mean RT, categorization was better performed in foveal (CVF) than extrafoveal vision (LVF and RVF). This result was not surprising with respect to the inner properties of the visual system (see Introduction), and consistent with prior reports using eccentricities close to ours [16]. More interesting was the novel finding of the opposite pattern in the two tasks, depending on the lateralization of the scene exposure, which we observed for accuracy. Indeed, detection yielded more errors in the right visual field, whereas it was the opposite for categorization, suggesting some right/left hemispheric dominance for detection/categorization respectively. In the detection task, the disadvantage for processing scenes in the RVF (or the advantage for the CVF and LVF) was also observed for the mean response time and the d' values.

The question arising here is whether such a left–right asymmetry may have been caused by a visual, attentional, or motor bias. Although eye movements were not recorded to control ocular fixation, our motivation to reject an oculomotor bias was twofold. First, our use of a fixation cross permanently overlapping the appearance of lateral stimuli, together with their close eccentricities, minimized the probability of the occurrence of express saccades during the exposure of lateral stimuli (see Procedure). Second, our detection task offered the left visual field an advantage, whereas motor biases of the eyes are rather rightward as evidenced for fixation [40], express saccades [41] or saccades during vergence [42]. With regard to spatial attention biases, Bowers et al. [43] evidenced a left bias in normal adults performing a line bisection task under visual or tactile modality, which they termed pseudoneglect in reference to a mirror behavior of the left neglect following right parietal brain damage. Parietal lesion studies have interpreted the deficit of neglect patients as a reduced orientation of attention to the left side [17] or an enhanced attention to the right side due to the disinhibition of the left hemisphere [18]. Though emphasis has traditionally been put on hemispheric imbalance and cerebral

lateralization, several studies have put forward the role of cultural factors in perceptual biases, such as reading direction (for reviews, see [44, 45]). In the present study, both hemispheric imbalance and reading habits could have influenced perceptual biases in processing the scenes, in a proportion that only a future cross-cultural study will enable us to determine.

With regard to the visual hypothesis, a previous study showed that the right hemisphere is dominant in visual perception in both directions [33]. Indeed, a patient who underwent an embolization of an arteriovenous malformation in her right occipito-temporal cortex (the ventral stream of her visual system) exhibited a visual defect in her left visual field, specifically a left inferior lateral quadrantanopia before the surgical operation, which spread a left lateral homonymous hemianopia after the embolization. Interestingly, she was also impaired in visually recognizing natural scenes in her spared right visual field, with the highest deficit affecting low-pass filtered scenes after the embolization [33]. In a fMRI study, Perez et al. [39] evidenced distinct neural networks for detection and categorization of natural scenes. Using stimuli-equivalent tasks (as here) and presenting scenes foveally, the authors showed that detection was accompanied by a bilateral activation of the occipital (Brodmann area 18/19), the internal temporal (BA37), and the supramarginal (BA40) gyri, whereas categorization activated the left extrastriate cortex (BA19). In addition, both tasks activated the primary motor cortex (BA4) bilaterally, as well as the left somatosensory (BA3) and occipito-temporo-parietal junction, confirming a common visuospatial mechanism.

Our results showed that visual demand adjusted the hemispheric imbalance and performance in left and right visual fields in ways compatible with the hemispheric specialization seen for detection and categorization. The associated visuo-attentional preferences remain to be further investigated.

We now move to the second issue on the interaction between the visual demand and the spatial frequencies of stimuli. As expected, the task significantly interacted with the spatial frequency content of scene images, due to coarse-to-fine processing in the categorization task, which almost disappears in the detection task. For categorization, the coarse-to-fine processing was due to an increasing mean response time from (i) unfiltered scenes, to (ii) LSF scenes, and finally (iii) HSF scenes. For accuracy, the coarse-to-fine processing took the form of a higher error rate for HSF scenes, while LSF and unfiltered scenes led to similar performance. Taken together, our results are in line with previous reports using hierarchical stimuli [1, 3] or natural scenes [10, 23]. Furthermore, the coarse-to-fine sequence was observed for variability of response time, which is to our knowledge a novel finding. Specifically, it exhibited the

same pattern as the mean response time, showing the robustness of this phenomenon. It is noteworthy that the within-participant variability of RT is not always correlated to the mean RT, as exemplified in the previously described interaction between the task and the visual field. Interestingly, in the detection task, a coarse-to-fine sequence was also observed for the mean response time, at a lower extent as compared to categorization. This result indicates that a visual analysis of the content of the scenes occurred, though such analysis was a priori not required for the detection task to be completed.

Finally, visual demand interacted with both the spatial location and the spatial frequency content of the scenes. Detection showed the previously described increasing error rate and mean response time from left to right, regardless of the spatial frequency content of scenes. In the categorization task, we expected a hemispheric specialization for the processing of spatial frequency based on previous reports using various stimuli. Indeed, the right/left hemispheres have been shown in normal adults to be advantaged for LSF/HSF processing respectively, using basic stimuli like gratings [21, 22] or more ecological stimuli like natural scenes [23, 33]. In fMRI studies using natural scenes, Peyrin et al. [24] were able to demonstrate that this hemispheric specialization occurred at an early stage of visual processing in the middle occipital gyrus or, as subsequently suggested, later in the occipito-temporal cortex [46]. In the present study, the categorization task showed that HSF scenes were better processed in the right visual field, in terms of accuracy. Nevertheless, we failed to replicate a left-right asymmetry for LSF stimuli. Even when considering the sex and age factors, our analysis failed to further reveal the expected hemispheric specialization for the processing of spatial frequencies, in men and/or young adults. One hypothesis to explain this result is that the exposure of our stimuli (100 ms) may have been too long. Indeed, Peyrin et al. [47] demonstrated by manipulating exposure duration of filtered natural scenes that the hemispheric specialization was preferentially observed for brief (30 ms) rather than long (150 ms) durations, consistent with the high sensitivity of the coarse-to-fine phenomenon for timing conditions [10].

To conclude, the visual demand induced by the specific instructions given to the participant directed their processing of natural scenes differently depending on spatial location and spatial frequency content of the stimuli. These results emphasize the important role of top-down processes in visual analysis, and provides a useful tool for future studies investigating visual disorders, which would differently affect low/high visual demand, left/right visual fields and low/high spatial frequencies. This study provides a useful framework for further exploring patients suffering from visual (cataract, glaucoma, macular degeneration) or

neurovisual disorders (quadrantanopias, hemianopias). Specifically, clinical examinations of these patients using perimetry tests, which are known for their poor repeatability [25, 26], can be complemented with detection and categorization tasks involving ecological stimuli presented at different locations of the visual field and with different spatial frequency filtering.

Acknowledgements The study was conducted at the Fondation Ophtalmologique Adolphe de Rothschild (Paris, France), and the results presented at the 2007 Biennial Meeting of Theoretical and Experimental Neuropsychology (Montréal, Canada). Olivier Coubard was supported by the Fédération des Aveugles et Handicapés Visuels de France (Paris), Céline Perez by the Edmond and Benjamin de Rothschild Foundations (Geneva, Switzerland and New York, USA). The authors thank the two reviewers for insightful comments on a preliminary version of the manuscript.

References

1. Navon D (1977) Forest before trees: the precedence of global features in visual perception. *Cogn Psychol* 9:353–383
2. Hughes HC, Nozawa G, Kitterle FL (1996) Global precedence, spatial frequency channels, and the statistic of the natural image. *J Cogn Neurosci* 8:197–230
3. Badcock JC, Whitworth FA, Badcock DR, Lovegrove WJ (1990) Low-frequency filtering and the processing of local-global stimuli. *Perception* 19:617–629
4. Kaplan E (2003) The M, P, and K pathways of the primate visual system. In: Chalupa LM, Werner JS (eds) *The visual neurosciences*. The MIT Press, Cambridge, pp 481–493
5. Bullier J (2001) Integrated model of visual processing. *Brain Res Brain Res Rev* 36:96–107
6. Bar M (2003) A cortical mechanism for triggering top-down facilitation in visual object recognition. *J Cogn Neurosci* 15:600–609
7. Berson DM (1988) Retinal and cortical inputs to cat superior colliculus: composition, convergence and laminar specificity. *Prog Brain Res* 75:17–26
8. Sugase Y, Yamane S, Ueno S, Kawano K (1999) Global and fine information coded by single neurons in the temporal visual cortex. *Nature* 400:869–873
9. Merigan WH, Maunsell JH (1993) How parallel are the primate visual pathways? *Annu Rev Neurosci* 16:369–402
10. Schyns PG, Oliva A (1994) From blobs to boundary edges: evidence for time- and spatial-scale-dependent scene recognition. *Psychol Sci* 5:195–200
11. Oliva A, Schyns PG (1997) Coarse blobs or fine edges? Evidence that information diagnosticity changes the perception of complex visual stimuli. *Cogn Psychol* 34:72–107
12. Oliva A, Torralba A (2007) The role of context in object recognition. *Trends Cogn Sci* 11:520–527
13. Martin PR, Grunert U (2003) Ganglion cells in mammalian retinae. In: Chalupa LM, Werner JS (eds) *The visual neurosciences*. The MIT Press, Cambridge, pp 410–421
14. Schiller PH, Tehovnik EJ (2001) Look and see: how the brain moves your eyes about. *Prog Brain Res* 134:127–142
15. Vuilleumier P, Amory JL, Driver J, Dolan RJ (2003) Distinct spatial frequency sensitivities for processing faces and emotional expressions. *Nat Neurosci* 6:624–631
16. Fize D, Fabre-Thorpe M, Richard G, Doyon B, Thorpe SJ (2005) Rapid categorization of foveal and extrafoveal natural images:

- associated ERPs and effects of lateralization. *Brain Cogn* 59:145–158
17. Heilman KM, Watson RT, Valenstein E (1993) Neglect and related disorders. In: Heilman KM, Valenstein E (eds) *Clinical neuropsychology*. Oxford University Press, New York, pp 279–336
18. Kinsbourne M (1993) Orientational bias model of unilateral neglect: evidence from attentional gradients within hemispace. In: Robertson IH, Marshall JC (eds) *Unilateral neglect: clinical and experimental studies*. Lawrence Erlbaum Associates, Hove, pp 63–86
19. Bookheimer S (2002) Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu Rev Neurosci* 25:151–188
20. Tulving E, Kapur S, Craik FI, Moscovitch M, Houle S (1994) Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory: positron emission tomography findings. *Proc Natl Acad Sci U S A* 91:2016–2020
21. Kitterle FL, Christman S, Hellige JB (1990) Hemispheric differences are found in the identification, but not the detection, of low versus high spatial frequencies. *Percept Psychophys* 48:297–306
22. Kitterle FL, Hellige JB, Christman S (1992) Visual hemispheric asymmetries depend on which spatial frequencies are task relevant. *Brain Cogn* 20:308–314
23. Peyrin C, Chauvin A, Chokron S, Marendaz C (2003) Hemispheric specialization for spatial frequency processing in the analysis of natural scenes. *Brain Cogn* 53:278–282
24. Peyrin C, Baci M, Segebarth C, Marendaz C (2004) Cerebral regions and hemispheric specialization for processing spatial frequencies during natural scene recognition. An event-related fMRI study. *Neuroimage* 23:698–707
25. Artes PH, Iwase A, Ohno Y, Kitazawa Y, Chauhan BC (2002) Properties of perimetric threshold estimates from Full Threshold, SITA Standard, and SITA Fast strategies. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 43:2654–2659
26. Artes PH, Hutchison DM, Nicoletta MT, LeBlanc RP, Chauhan BC (2005) Threshold and variability properties of matrix frequency-doubling technology and standard automated perimetry in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 46:2451–2457
27. Oldfield RC (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9:97–113
28. Weber H, Aiple F, Fischer B, Latanov A (1992) Dead zone for express saccades. *Exp Brain Res* 89:214–222
29. Fischer B, Ramsperger E (1984) Human express saccades: extremely short reaction times of goal directed eye movements. *Exp Brain Res* 57:191–195
30. Saslow MG (1967) Effects of components of displacement-step stimuli upon latency for saccadic eye movement. *J Opt Soc Am* 57:1024–1029
31. Fischer B, Gezeck S, Hartnegg K (1997) The analysis of saccadic eye movements from gap and overlap paradigms. *Brain Res Brain Res Protoc* 2:47–52
32. Erilhagen W, Schoner G (2002) Dynamic field theory of movement preparation. *Psychol Rev* 109:545–572
33. Peyrin C, Chokron S, Guyader N, Gout O, Moret J, Marendaz C (2006) Neural correlates of spatial frequency processing: A neuropsychological approach. *Brain Res* 1073–1074:1–10
34. Siegel S, Castellan NJ (1988) *Non parametric statistics for the behavioral sciences*. McGraw-Hill, New York
35. Cabeza R (2002) Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychol Aging* 17:85–100
36. Cavézian C, Gaudry I, Perez C, Coubard O, Doucet G, Peyrin C, Marendaz C, Obadia M, Gout O, Chokron S (2009) Specific impairments in visual processing following lesion side in hemianopic patients. *Cortex* Sep 8 [Epub ahead of print]
37. Treisman AM, Gelade G (1980) A feature-integration theory of attention. *Cogn Psychol* 12:97–136
38. Thorpe S, Fize D, Marlot C (1996) Speed of processing in the human visual system. *Nature* 381:520–522
39. Perez C, Cavézian C, Peyrin C, Coubard O, Doucet G, Andersson F, Gout O, Savatovsky J, Chokron S (2009) Plasticité des aires visuelles corticales après une lésion rétinochiasmique: approche en neuro-imagerie. *Rev Neuropsychol* 1:254–260
40. Gowen E, Abadi RV (2005) Saccadic instabilities and voluntary saccadic behaviour. *Exp Brain Res* 164:29–40
41. Honda H (2002) Idiosyncratic left-right asymmetries of saccadic latencies: examination in a gap paradigm. *Vis Res* 42:1437–1445
42. Coubard OA, Kapoula Z (2008) Saccades during symmetrical vergence. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 246:521–536
43. Bowers D, Heilman KM (1980) Pseudoneglect: Effects of hemispace on a tactile line bisection task. *Neuropsychologia* 18:491–498
44. Kazandjian S, Chokron S (2008) Paying attention to reading direction. *Nat Rev Neurosci* 9:965, author reply 965
45. Chokron S, Kazandjian S, De Agostini M (2009) Effects of reading direction on visuospatial organization: a critical review. In: Gari A, Mylonas K (eds) *Quod erat demonstrandum: from Herodotus' ethnographic journeys to cross-cultural research*. Pedio Books Publishing, Athens, pp 107–114
46. Peyrin C, Schwartz S, Seghier M, Michel C, Landis T, Vuilleumier P (2005) Hemispheric specialization of human inferior temporal cortex during coarse-to-fine and fine-to-coarse analysis of natural visual scenes. *Neuroimage* 28:464–473
47. Peyrin C, Mermillod M, Chokron S, Marendaz C (2006) Effect of temporal constraints on hemispheric asymmetries during spatial frequency processing. *Brain Cogn* 62:214–220

4. Discussion et Conclusion

Les résultats obtenus sont assez surprenants et soulignent bien l'effet de la consigne donnée aux participants, sur le traitement visuel des scènes naturelles, malgré la similitude des stimuli. En d'autres termes on peut dire que le traitement de stimuli visuels peut être influencé seulement par la consigne.

Le résultat principal de cette étude est que la tâche interagit significativement avec le champ visuel de présentation et les fréquences spatiales des scènes. Nous allons d'abord discuter de l'effet de la tâche et des problèmes méthodologiques s'y rapportant, avant d'entrer dans le corps de la discussion à propos de cette interaction entre les tâches et les deux autres facteurs (CV/FS).

Globalement, la tâche de catégorisation nécessite un traitement plus long d'environ 33% pour toutes les conditions par rapport à la tâche de détection (TR moyen obtenu : 622 ms *vs* 466 ms, respectivement). Ceci peut s'expliquer par la probabilité d'occurrence de la cible pour la tâche de catégorisation qui est de 50% alors qu'elle est de 75% pour la tâche de détection. Ceci peut expliquer les TR plus courts obtenus lors de cette dernière. Néanmoins, une étude récente ayant comparé la détection et la catégorisation de scènes naturelles avec une probabilité d'occurrence de la cible identique pour les deux tâches (60%) retrouve également un TR plus long pour la tâche de catégorisation de 24% (Cavézian et *al.*, 2009), reflétant probablement un coût plus important pour la réalisation de la tâche de catégorisation par rapport à la tâche de détection.

Il y a un effet important de la présence de la cible : les résultats font ressortir que les participants ont plus de difficultés à détecter l'absence de la cible que sa présence (+2.2% d'erreur, +87ms de TR et une variabilité des TR de +21ms pour les essais sans cible). Ce résultat a déjà été observé par certaines études sur la recherche visuelle de cible soulignant un temps de traitement plus important pour les essais sans cible, qui demandent un arrêt de la recherche visuelle initiée (Mijovic-Prelec, Shin, Chabris et Kosslyn, 1994). On peut l'expliquer par le fait que l'on prenne plus de temps en cas d'absence de cible car cela requiert une recherche exhaustive du champ visuel droit et gauche, tandis que la recherche s'interrompt dès que la cible est trouvée dans le cas où elle est présente.

Nous supposons que notre tâche de détection sollicite le même type de traitement, en l'absence de mouvement oculaire (*Cf* article 2 ci-après dans lequel est détaillée la manière dont nous avons contrôlé les mouvements des yeux : temps de présentation des cibles / excentricité des cibles / croix de fixation centrale). De plus, ces performances obtenues avec des TR plus longs, des taux d'erreurs plus importants ainsi qu'une plus grande variabilité des réponses obtenues pour cette condition sans cible, souligne la mise en place d'un traitement supplémentaire, qui a été mis en évidence lors d'études menées en EEG (électro-encéphalographie) (Thorpe et *al.*, 1996) et en IRMf (Fize et *al.*, 2005) observant une activité cérébrale plus importante lors des essais sans cible par rapport à celle obtenue pour les essais avec cible. Un dernier point important à aborder concernant la méthodologie, est l'utilisation de dix images pour chaque catégorie, qui ont été présentées 18 fois à chaque participant. On peut alors s'attendre à un effet de répétition avec une amélioration des performances pour les derniers blocs. Par conséquent nous avons réalisé une ANOVA (ANalysis Of VAriance (analyse de variance)) avec le bloc en facteur intra-sujet, qui révèle un effet du bloc uniquement pour la tâche de détection et seulement pour le taux d'erreur moyen ($F(3,87)=4.90$, $P<.01$), avec une diminution du taux d'erreurs du bloc 1 à 2 et du bloc 3 à 4. Pour la tâche de catégorisation il n'y a pas d'effet significatif du bloc à la fois pour le taux d'erreur ($F(2,58)=1.27$, $P>.05$), et pour les TR ($F<1$) ainsi que pour la variabilité des TR ($F(2,58)=2.95$, $P>.05$). Ce résultat d'absence d'effet du bloc pour la tâche de catégorisation et ceci pour toutes les mesures (TR et TE) confirme que les participants de cette étude ont bien réalisé une tâche de catégorisation même si les stimuli devenaient familiers au fur et à mesure de l'expérience.

Abordons maintenant la discussion des résultats principaux de cette étude. Nous voulons évaluer l'influence de la demande visuelle sur le traitement de scènes naturelles. Plus précisément, nous souhaitons explorer les effets d'un simple changement de consigne sur le comportement des participants lors de l'analyse visuelle de scènes naturelles. Nous avons alors choisi une consigne demandant au participant de réaliser une tâche de détection impliquant la prise de décision de la présence ou non d'un objet visuel. Et une consigne demandant au participant de réaliser une tâche de catégorisation impliquant un traitement sémantique des images, une ségrégation des traits physiques de l'image en référence aux objets appartenant à la même catégorie, induisant l'attribution de l'exemplaire à une catégorie existante. Ces deux processus (détection/catégorisation) partagent un traitement visuo-spatial

commun, cependant ils sont probablement sous-tendus par des circuits neuronaux différents [Article 3].

Le premier intérêt de cette étude concerne l'interaction entre la demande visuelle (le type de tâche induit : détection / catégorisation) et le champ visuel de présentation (champ visuel gauche/central/droit). Tout d'abord, concernant les TE : les performances obtenues pour la tâche de catégorisation en CV central sont meilleures que celles obtenues en champs périphériques (CVd et CVg). Ce résultat est loin d'être surprenant si l'on tient compte des propriétés du système visuel (*Cf* chapitre 1) en effet l'acuité en fovéa est meilleure pour traiter les informations visuelles par rapport au champ visuel périphérique (Vighetto, 1998).

Un autre résultat très intéressant est le pattern opposé observé pour la précision des réponses entre les deux tâches selon le champ visuel d'apparition de la cible. En effet, les performances en détection sont moins bonnes dans le champ visuel droit alors qu'elles sont moins bonnes dans le champ visuel gauche pour la tâche de catégorisation, suggérant alors, la présence d'une dominance hémisphérique droite/gauche pour la détection/catégorisation (respectivement). Concernant, la tâche de détection, ce désavantage pour le traitement des scènes dans le CV droit (ou l'avantage pour le CV central et gauche) s'observe également pour le TR moyen et le d'. La question est de savoir si une telle asymétrie droit/gauche est provoquée par un biais : visuel, attentionnel ou moteur ? Un biais oculomoteur pourrait aussi expliquer ce résultat, mais nous n'avons pas enregistré les mouvements oculaires des participants par conséquent nous ne pouvons pas le rapporter. Cependant, nous rejetons cette explication pour deux raisons. Tout d'abord, c'est vrai que l'être humain est capable d'élaborer des mouvements oculaires très rapides avec des latences inférieures à 100 ms (le temps d'apparition de nos stimuli), plus précisément en dessous de 80-120 ms (Fischer et Ramsperger, 1984). Cependant, ces très courtes latences de mouvements des yeux sont en général provoquées lorsqu'il y a un intervalle de temps entre la disparition du point de fixation et l'apparition de la cible (Saslow, 1967). Dans notre expérience, l'apparition des scènes se superpose à la croix de fixation, par conséquent cet aménagement ne devrait pas provoquer de mouvements oculaires au dessus de 200ms (Fischer, Gezeck, Hartnegg, 1997).

Deuxièmement, notre tâche de détection sollicite un avantage du champ visuel gauche alors que le biais oculomoteur est en général plutôt observé sur la droite comme cela a été décrit

pour les saccades rapides (Honda, 2002) et les saccades de vergences (Coubard, Kapoula, 2008). Concernant le biais attentionnel, certains auteurs (Bowers, Heilman, 1980) ont mis en évidence chez des adultes sains, lors d'une tâche de bisection de ligne, un biais sur la gauche quelle que soit la modalité : visuelle ou tactile, ce qui a été appelé « pseudo-négligence » en référence à un effet miroir du comportement observé chez les patients hémipariétaux gauches à la suite d'une lésion pariétale droite. Les études des lésions pariétales ont interprété le déficit observé chez les patients hémipariétaux gauches comme une diminution de l'orientation de l'attention du côté de l'hémi-espace gauche (Heilman et al., 1993) ou comme une aimantation de l'attention du côté droit au détriment du gauche, du fait de la désinhibition de l'hémisphère gauche sain qui n'est plus sous l'emprise de l'hémisphère droit dominant dans ce cas lésé (Kinsbourne, 1993).

D'autres études ont montré un effet du sens de lecture comme biais perceptif (pour revue : Kazandjian, Chokron, 2008 ; Chokron et al., 2009). En effet Chokron et al. (2009) en comparant des lecteurs Français lisant de gauche à droite et de lecteurs Israéliens avec une habitude de lecture inverse : de droite à gauche, ont observé un pattern opposé chez les deux groupes, à la fois à la tâche de bisection de lignes, et de préférence esthétique pour des objets statiques ou en mouvements (selon leur orientation : sur la gauche ou sur la droite). Dans cette présente étude, nous avons inclus que des participants droitiers avec des habitudes de lecture de gauche à droite, ce qui peut bien évidemment influencer le traitement des scènes naturelles.

Concernant l'hypothèse visuelle, une étude a montré la dominance de l'hémisphère droit lors d'une tâche visuelle de reconnaissance de scènes (Peyrin et al., 2006). Pour cela, ils ont présenté les performances et les activations cérébrales d'une patiente ayant participé au protocole à la suite de l'embolisation d'une malformation artérioveineuse. Sa MAV était située au niveau du cortex occipito-temporal droit (sur la voie ventrale de son système visuel, cf chapitre 1, point 3.). Cette patiente présentait avant son intervention chirurgicale une amputation du quadrant inférieur gauche de son champ visuel évoluant vers une hémianopsie latérale homonyme gauche après l'embolisation de sa MAV. De manière surprenante, elle fut en difficulté pour la reconnaissance de scènes naturelles dans son champ visuel droit sain (Peyrin et al., 2006). Ce résultat souligne l'implication de l'hémisphère droit (régions

postérieures) dans le traitement visuel et ce, même dans le champ visuel considéré comme sain.

Par ailleurs, concernant la tâche de catégorisation nous n'observons pas d'effet du champ visuel de présentation ceci uniquement pour les scènes non filtrées. Ce résultat va dans le sens du modèle de Goldberg selon lequel les scènes naturelles sont traitées de manière équivalente par les deux hémisphères, il n'y aurait donc pas de spécialisation hémisphérique pour traiter les scènes non-filtrées (voir Peyrin et *al.*, 2003). Chez les participants contrôles (hommes jeunes, femmes jeunes et hommes âgés) les résultats montrent que le traitement est plus lent pour les scènes en hautes fréquences par rapport à celles en basses fréquences et non filtrées. Ce résultat va dans le sens de certains travaux suggérant que les informations BFS précèdent les informations HFS au niveau des aires visuelles primaires (Marendaz et *al.*, 2003). Ce qui met en évidence que le traitement visuel des scènes naturelles suit un principe de traitement *coarse-to-fine*, selon lequel l'information grossière issue des basses fréquences, est disponible avant l'information plus fine, véhiculée par les hautes fréquences spatiales. Les basses fréquences étant traitées par la voie magnocellulaire sont plus rapidement traitées que les hautes fréquences traitées par la voie parvocellulaire (Van Essen et DeYoe, 1995 ; Bullier et *al.*, 2001). On remarque que les hommes âgés sont aussi rapides que les jeunes pour détecter les scènes en basses fréquences, ce qui va dans le sens des résultats observés par Roux et Ceccaldi (2001) selon lesquels les processus du traitement global ne sont pas affectés par l'âge.

Nous abordons dès à présent, la discussion des résultats observés concernant l'interaction entre la demande visuelle de la tâche émise par la consigne et les fréquences spatiales des stimuli. Comme attendu, la tâche interagit significativement avec les FS contenues dans les scènes, du fait d'un traitement *coarse-to-fine* pour la tâche de catégorisation qui n'existe pas pour la tâche de détection.

Pour la tâche de catégorisation, nous obtenons des performances allant dans le sens d'un traitement *coarse-to-fine* du fait d'une augmentation du temps de réponse moyen allant des scènes non filtrées, aux scènes en BFS et enfin aux scènes en HFS. Pour la précision des réponses le traitement *coarse-to-fine* est présent, un plus fort taux d'erreurs est observé pour les scènes filtrées en HFS, alors que les performances obtenues pour les scènes en BFS et en NF sont statistiquement semblables. Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus dans

certaines études utilisant des stimuli hiérarchiques (Navon, 1977 ; Badcock et *al.*, 1990) ainsi que des scènes naturelles (Schyns et Oliva, 1994 ; Peyrin et *al.*, 2003). D'autre part, les scènes de villes en basses fréquences sont plus vite traitées dans le champ visuel gauche que dans le champ droit. Et les scènes de forêts en hautes fréquences sont plus vite traitées dans le champ visuel droit que dans le champ gauche. Ce résultat met également en avant, que les caractéristiques physiques des scènes de villes favorisent un traitement global et celles des forêts induisent un traitement plus local (Mermillod et *al.*, 2005).

Dans cette étude, nous constatons également, concernant la tâche de catégorisation que les scènes en HFS sont mieux traitées (en termes de précision de réponses) dans le CV droit. Néanmoins nous n'avons pas retrouvé d'asymétrie gauche/droite concernant les stimuli en BFS.

Afin d'affiner les comparaisons entre les scènes en HFS et BFS selon le champ visuel de présentation, nous avons analysé séparément, les performances des hommes et des femmes ainsi que les performances des participants selon leur âge : jeune / âgé. Nous avons ainsi créé 4 groupes : (i) 9 femmes âgées de 22.8-41.7 ans, (ii) 9 hommes âgés de 22.0-43.1 ans, (iii) 7 femmes âgées de 53.8-77.2 ans, et (iv) 7 hommes âgés de 55.4-72.5 ans – le niveau d'éducation et la préférence manuelle ont été contrôlés afin qu'il n'y ait pas de différences entre chaque groupe. Néanmoins, nos analyses ne retrouvent pas d'effet de spécialisation hémisphérique pour le traitement des FS en fonction du champ visuel de présentation. Nous pouvons expliquer ce résultat par le fait que la présentation de nos scènes à l'écran était de 100ms, ceci est probablement un temps trop long pour observer un effet de spécialisation hémisphérique. En effet Peyrin et *al.* (2006) ont manipulé le temps de présentation des scènes à l'écran et ont mis en évidence que la spécialisation hémisphérique lors du traitement des fréquences spatiales était préférentiellement observé lors d'un temps de présentation court de l'image de 30 ms plutôt qu'un temps de 150ms.

Chez les femmes jeunes, il n'y a pas de traitement préférentiel des basses fréquences ou des hautes fréquences dans le champ visuel droit ou gauche. Ce résultat évoque que les femmes ne présenteraient pas de spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales contrairement aux performances obtenues par les hommes jeunes. Mais comme nous l'avons abordé, la spécialisation hémisphérique serait moins marquée chez les femmes.

Certains auteurs (Roalf et *al.*, 2006) ont démontré que les femmes sont moins latéralisées que les hommes dans les tâches visuo-spatiales. Les fluctuations du niveau d'hormones durant le cycle menstruel affecterait l'asymétrie hémisphérique chez les femmes, qui se traduirait par un partage entre les deux hémisphères de l'activation neuronale (Hausmann, 2005), c'est-à-dire une plus grande bilatéralisation de celle-ci.

Ces résultats nous amènent à aborder l'effet du type de scènes. En effet chez les hommes jeunes et âgés, nous observons un effet du type de scène. Les villes sont plus rapidement et plus précisément traitées que les forêts. Ce résultat peut s'expliquer par les caractéristiques physiques des scènes. En effet, le contour des scènes est plus visible pour les villes que pour les forêts. De fait, on peut supposer que les scènes de villes permettraient plus facilement l'accès à l'information globale, que les scènes de forêts. Ce résultat va dans le sens de certaines études selon lesquelles la catégorisation des scènes est rapide puisqu'elle s'effectue principalement sur les caractéristiques globales de celles-ci (Wichmann et *al.* 2006). D'autre part, la simulation connexionniste du modèle proposé par Mermillod, Guyader et Chauvin (2005), met en évidence que le système perceptif s'appuierait plutôt sur les BFS pour catégoriser les villes, et sur les HFS pour catégoriser les forêts. Ces auteurs suggèrent que l'accès aux détails est nécessaire pour reconnaître certaines scènes extérieures telles que les forêts alors que les villes pourraient être catégorisées sans utiliser les détails de l'image. Ces résultats vont dans le sens également du modèle d'Oliva et Schyns (1997), selon lequel la catégorisation de scènes serait flexible et dépendrait des caractéristiques de l'image à catégoriser.

Chez les hommes âgés, nous remarquons qu'il n'y a pas de traitement préférentiel des fréquences spatiales selon le champ visuel de présentation. Les résultats mettent en évidence que les temps de réponses sont identiques pour traiter les basses fréquences dans le champ visuel droit et gauche, nous constatons le même profil de résultats pour les hautes fréquences (temps de réponses identiques dans le champ visuel droit et gauche). Ces résultats reflètent une plus grande bilatéralisation dans le traitement des fréquences spatiales, qui va dans le sens du modèle HAROLD dans lequel les auteurs n'observent plus de pattern de spécialisation hémisphérique chez les sujets âgés (Cabeza et *al.*, 2004).

Pour conclure, la demande visuelle provoquée par la consigne donnée aux participants dirige différemment leur traitement des scènes naturelles visuelles selon leur fréquences spatiales (HFS /BFS/NF) et leur localisation spatiale (présentées dans le champ visuel central, gauche ou droit). Ces résultats soulignent l'importance des processus « *top-down* » de haut niveau dans l'analyse et le traitement visuel.

Ceci va nous permettre lors de notre seconde étude menée cette fois chez les patients hémianopsiques d'évaluer les performances : lors d'une tâche de reconnaissance de scènes de bas et de haut niveau (selon la consigne), dans le champ visuel central, gauche et droit et lors du traitement des hautes et des basses fréquences spatiales.

Maintenant que nous avons évalué les performances de sujets sains obtenues lors de ce protocole, nous allons pouvoir le proposer à des patients hémianopsiques. L'intérêt d'un modèle lésionnel, est qu'il consiste à évaluer les répercussions d'une lésion en fonction de sa localisation sur le fonctionnement humain et notamment visuel, pour ensuite inférer un rôle cognitif, une fonction à la région lésée. Nous avons vu précédemment (PARTIE 1, Chapitre 2) à l'aide de diverses études que les processus visuels complexes sont sous-tendus par une spécialisation hémisphérique au sein d'aires corticales postérieures pourtant décrites comme primaires ou de bas niveau. Par conséquent il semble intéressant d'étudier ce phénomène d'un point de vue lésionnel : chez des patients hémianopsiques souffrant d'une lésion de ces régions corticales c'est à dire du cortex visuel primaire.

Résumé

Nous évaluons l'influence de la consigne (effet d'un traitement *top-down*) sur le traitement visuel de scènes naturelles. Pour cela nous mesurons le temps de réponse ainsi que la précision des réponses (taux de réponses correctes) obtenus par des adultes sains réalisant deux tâches construites à l'identique (avec les mêmes stimuli). Nous utilisons des scènes naturelles filtrées en hautes fréquences spatiales, en basses fréquences spatiales et non-filtrées. Celles-ci sont présentées dans le champ visuel droit, gauche et central. Les deux tâches (détection *vs* catégorisation) diffèrent uniquement par la consigne verbale donnée au préalable. La tâche de détection consiste à signaler à l'aide d'un boîtier réponse (avec l'index et le majeur) si l'image est présente ou pas à l'écran. Durant la tâche de catégorisation les participants doivent indiquer (à l'aide du boîtier réponse) si l'image présente à l'écran est une ville ou une autoroute. Les résultats mettent en évidence une meilleure précision des réponses durant la tâche de détection pour les scènes filtrées en basses fréquences spatiales et durant la tâche de catégorisation pour traiter les cibles présentées dans le champ visuel droit. L'interaction entre la tâche réalisée (induite par la consigne) et les fréquences spatiales révèle un traitement *coarse-to-fine*, à la fois pour la précision des réponses obtenues et pour les temps de réponses. Concernant l'interaction tâche/champ visuel de présentation et fréquences spatiales, on observe un avantage du champ visuel droit de présentation (traitement effectué par l'hémisphère gauche) pour les temps de réponses concernant le traitement des scènes en hautes fréquences spatiales durant la tâche de catégorisation uniquement. En revanche, on observe un avantage du champ visuel gauche pour le traitement de toutes les fréquences spatiales pour la tâche de détection aussi bien pour les temps que pour la précision des réponses. Pour conclure, ces résultats soulignent l'effet de la consigne, qui est essentielle pour comprendre le traitement visuel réalisé par chaque hémisphère. A l'aide de la consigne on pousse le sujet à réaliser un traitement différent (effet *top-down*) pour le traitement de stimuli visuels identiques. Cette étude évalue donc l'effet de la consigne, l'effet du champ visuel de présentation des scènes et l'effet des fréquences spatiales contenues dans les stimuli. De plus, les stimuli utilisés sont écologiques (scènes visuelles complexes) et permettent d'ouvrir des horizons pour établir de nouveaux outils d'évaluation ou de prises en charge de patients souffrant de difficultés visuelles.

CHAPITRE 2 : APPROCHE NEUROPSYCHOLOGIQUE : TRAITEMENT DES SCENES VISUELLES CHEZ DES PATIENTS HEMIANOPSIQUES

Ce second chapitre s'articule en deux parties : la première présente les résultats obtenus lors d'une étude comportementale menée chez les patients hémianopsiques lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles en champ visuel central. La seconde présente également les résultats obtenus lors d'une étude comportementale menée chez les patients hémianopsiques lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles présentées cette fois en champs latéralisés.

I. Etude 2 : L'HLH comme modèle pathologique du traitement visuel : effet d'une lésion occipitale gauche ou droite sur la reconnaissance de scènes naturelles en champ central.

Avant d'aborder les capacités présentes dans l'hémichamp aveugle des patients HLH, il semble important et nécessaire d'évaluer leurs capacités de reconnaissance de scènes dans leur champ visuel central car cela a très peu été étudié. Par conséquent nous avons adapté un protocole expérimental à l'évaluation de la reconnaissance de scènes (villes/autoroute) non filtrées, et filtrées en HFS et BFS. A l'aide de la consigne induisant une tâche de détection nous allons évaluer les capacités visuelles de bas niveau cognitif et à l'aide d'une consigne de catégorisation induisant une tâche plus complexe, nous pourrions évaluer un processus de plus haut niveau. Nous nous attendons à un effet de la latéralisation de la lésion : avec un déficit spécifique lors du traitement des HFS chez les patients HLHd (cérébro-lésés gauche), et spécifique aux BFS chez les patients HLHg (cérébro-lésés droit) selon l'hypothèse d'asymétrie hémisphérique lors du traitement des fréquences spatiales. Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenus lors de cette étude comportementale (sous-forme d'article) qui a suivie une approche neuropsychologique et cognitive.

1. Hypothèses générales

Cette étude vise à appréhender les capacités de vision centrale des patients hémianopsiques dans la reconnaissance rapide de scènes naturelles, et la façon dont ils traitent les fréquences spatiales en fonction du site de leur lésion cérébrale. Une tâche de détection et une tâche de catégorisation sont proposées aux sujets, les consignes diffèrent cependant les stimuli sont identiques. Les images utilisées sont soit filtrées du point de vue des FS soit non filtrées.

- Concernant la tâche avec la consigne de détection, tous les sujets devraient être plus rapides que pour la tâche avec la consigne de catégorisation. Un effet du type de tâche réalisé selon la consigne donnée est alors attendu.

- La spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales pourrait dépendre de la tâche à accomplir (induite par la consigne). La détection est une activité qui ne nécessite pas de traitement approfondi de l'image. De ce fait, il ne devrait pas apparaître d'effet du type de fréquences spatiales pour cette tâche. En revanche, la catégorisation est un processus cognitif de haut niveau, qui implique l'utilisation des FS. Un effet principal du type de fréquences devrait alors être retrouvé dans cette tâche.

- Le traitement des FS par les sujets sains, devrait, pour la tâche de catégorisation, suivre un décours temporel *coarse-to-fine*, avec des réponses plus rapides pour les BFS que pour les HFS.

- Les patients porteurs d'une lésion occipitale unilatérale devraient, d'une manière générale, être plus ralentis au niveau du traitement visuel (quel qu'il soit) que les sujets sains.

- Enfin, si chaque cortex visuel est spécialisé pour le traitement d'un type de fréquences spatiales, les patients porteurs d'une lésion occipitale unilatérale devraient être gênés dans le traitement des fréquences supposées gérées par l'hémisphère lésé, lors de la catégorisation rapide de scènes naturelles.

2. Méthode expérimentale

2.1. Participants

Deux groupes de sujets ont été constitués. Un groupe se compose de 11 patients cérébro-lésés présentant une HLH droite (6 patients) ou gauche (5 patients), avec ou sans épargne maculaire. Ce groupe est composé exclusivement d'hommes droitiers (évaluation de la préférence manuelle par le test de préférence manuelle de Dellatolas et *al.*, 1988). Leur déficit visuel est objectivé par une périmétrie automatisée (Humphrey). Un bilan neurovisuel a permis de choisir des patients sans trouble associé susceptible de biaiser les résultats de cette expérience (négligence spatiale unilatérale, anosognosie, agnosie visuelle, etc.). La négligence spatiale unilatérale a été appréhendée par le biais des comptes rendus neuropsychologiques, et les scores au test du barrage des cloches de la BEN (GEREN, 2002) à différentes périodes de leur suivi neuropsychologique. De plus, aucun de ces patients, d'après les comptes rendus médicaux, ne présentent de trouble moteur pouvant invalider les temps de réponse enregistrés (donnés manuellement).

Un groupe contrôle composé de 25 hommes droitiers appariés aux patients cérébro-lésés en fonction de leur sexe, et de leur âge a été constitué. Les participants contrôles ne présentent aucun antécédent neurologique.

Tous les participants ont une vision normale ou corrigée, et ils sont évalués sur la base du Mini Mental State Examination (MMSE, de Folstein, Folstein, et McHugh, 1975) pour écarter tout signe évident de détérioration cognitive globale.

2.2. Matériel et procédure

2.2.1. Stimuli

Huit images originales en noir et blanc (256*256, 256 niveau de gris) ont été sélectionnées. Il s'agit de 6 images de villes et deux images d'autoroutes. Chaque image est filtrée selon trois types de fréquences : non filtrée (NF), filtrée pour ne laisser que les HF, et filtrée pour ne laisser que les BF (voir figure 1 pour un exemple). Une image grise a été fabriquée (256*256, 256 niveau de gris), celle-ci est de la même couleur que le fond d'écran. Chaque image est présentée dans un cadre noir, pour faciliter la détection des images grises. Une expérience préalable a été administrée à 16 participants âgés de 18 à 31 ans, hommes et femmes, droitiers, afin d'exclure l'existence d'un effet du type de scène présentée.

Ceci a permis l'utilisation principale d'un seul type de scènes comme stimulus-test, à savoir les villes. Les autres images sont considérées comme des « *catch trials* ».

2.2.2. Procédure

Chaque participant est placé à 100 cm d'un écran d'ordinateur 19 pouces, afin d'obtenir une taille d'image de 4° angulaire. Les images sont projetées dans le champ visuel central *via* le logiciel E-Prime.

Les participants effectuent la tâche selon deux consignes différentes. La tâche proposée est composée de 12 blocs d'images (ce protocole a été construit en bloc dans le but de le réaliser en IRMf, ces résultats sont présentés dans le chapitre 2 de la PARTIE 3) :

- 4 blocs sont composés de 8 images non filtrées (6 villes et 2 autoroutes), et deux images grises, identiques au fond d'écran.
- 4 blocs sont composés de 8 images filtrées en HF (6 villes et 2 autoroutes), et deux images grises, identiques au fond d'écran.
- 4 sont composés de 8 images filtrées en BF (6 villes et 2 autoroutes), et deux images grises, identiques au fond d'écran.

a. Déroulement d'un essai

Un point de fixation est présenté pendant 600 ms, suivi d'une image (100 ms) sur fond gris, d'une plage de réponse de 1000 ms, et d'un intervalle inter-stimuli de 900 ms (écrans gris).

b. Tâche

Durant la tâche avec la consigne de détection, le sujet doit juger de la présence (bouton du haut) ou non (c'est à dire une image grise) (bouton du bas) d'une image. La réponse, ainsi que le temps de réponse (TR), sont enregistrés sur un boîtier dont les boutons de réponse sont placés sur le plan sagittal. Le participant répond avec la main droite.

Pour la tâche avec la consigne de catégorisation, le participant doit décider si l'image présentée est une ville, ou s'il n'y a pas d'image à l'intérieur du cadre de présentation (bouton du haut, majeur), ou encore, si c'est une autoroute (bouton du bas, index).

Les boutons de réponse sont contre-balançés à l'intérieur de ces deux expériences en inter-sujets, et entre ces deux expériences en intra-sujets (les participants dont la réponse est majoritairement en haut dans la tâche de détection répondent majoritairement en bas dans la tâche de catégorisation, et inversement).

2.2.3. Plan d'expérience

$$S_{32} < G_3 > T_2 * FS_3$$

S : 36 Sujets.

G : Groupe. g1= patients présentant une HLH droite (HLHd), g2= patients présentant une HLH gauche (HLHg), g3= sujets contrôles.

T : Tâche induite par la consigne. t1= détection, t2= catégorisation.

FS : Filtrage de l'image. f1= NF, f2= HF, f3= BF.

2.2.4. Hypothèses opérationnelles

- Effet principal du groupe pour chaque tâche effectuée selon la consigne donnée

Les participants sains devraient présenter des TR significativement plus courts que les patients hémianopsiques, à la fois pour la tâche avec la consigne de détection et celle de catégorisation.

- Effet principal de la consigne pour chaque groupe

La consigne de détection devrait impliquer des TR significativement plus courts que celle de catégorisation, quel que soit le groupe, même si le matériel utilisé est identique.

- Fréquences spatiales et consigne donnée

Dans la tâche avec la consigne de détection, il ne devrait pas apparaître de différence significative du type de fréquences spatiales présentées. Dans la tâche avec la consigne de catégorisation, un effet principal du type de fréquences spatiales est attendu. On s'attend également à une interaction entre l'effet de la consigne (détection vs catégorisation) et les fréquences spatiales. Les TR moyens pour chaque fréquence spatiale devraient varier en fonction de la consigne donnée.

- Effet des fréquences spatiales pour chaque groupe, et chaque consigne

Quel que soit le groupe, pour la tâche avec la consigne de détection, aucune différence n'est attendue entre les différents filtrages des images. En revanche, en catégorisation, des différences significatives entre les fréquences spatiales devraient apparaître (même si c'est la même tâche que pour la consigne de détection), avec des patterns de réponses différents selon les groupes. Pour les sujets contrôles, les TR des NF devraient être plus courts que les TR des BFS, ceux-ci plus courts que les TR des HFS. Pour les patients HLHg, les TR des HFS devraient être plus courts que les TR des NF, ceux-ci plus courts que les TR des BFS. Pour patients HLHd, les TR des BFS devraient être plus courts que les TR des NF, ceux-ci plus courts que les TR des HFS.

Nous allons dès à présent présenter les résultats de cette étude sous forme d'article ci-après [Article 2], intitulé : Specific impairments in visual processing following lesion side in hemianopics patients.

Article 2



available at www.sciencedirect.com



journal homepage: www.elsevier.com/locate/cortex



Research report

Specific impairments in visual processing following lesion side in hemianopic patients

Céline Cavézian^{a,b}, Isabelle Gaudry^{a,b,c}, Céline Perez^{a,b,c}, Olivier Coubard^{a,b},
Gaëlle Doucet^d, Carole Peyrin^a, Christian Marendaz^a, Mickaël Obadia^{b,c},
Olivier Gout^{b,c} and Sylvie Chokron^{a,b,c,*}

^a Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, CNRS, UMR 5105, UPMF, Grenoble, France

^b ERT TREAT VISION, Fondation Ophtalmologique Rothschild, Paris, France

^c Service de Neurologie, Fondation Ophtalmologique Rothschild, Paris, France

^d CI-NAPS, Centre for Imaging-Neurosciences and Applications to Pathologies, CNRS, CEA, Caen University, Paris Descartes University, UMR 6232, Caen, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2008

Reviewed 25 February 2009

Revised 6 May 2009

Accepted 12 August 2009

Action editor Jane Riddoch

Published online 8 September 2009

Keywords:

Hemianopia

Spatial frequencies

Natural scenes

Detection

Categorization

ABSTRACT

Introduction: Following unilateral damage of the primary visual cortex one of the most common visual field defects observed is Homonymous Hemianopia (HH), a loss of vision of the contralesional hemifield in each eye. The ipsilesional ("intact") part of the central visual field is often used to compensate for difficulties encountered in the peripheral hemianopic visual field. However, the quality of vision within the central visual field is not well-known.

Methods: To better describe and understand visual processing in hemianopia, two tasks were conducted with 25 healthy controls, six left hemianopes, and five right hemianopes. Filtered (in high, above 6 cycles/degree, or low, below 4 cycles/degree, spatial frequencies – HSF and LSF, respectively) and unfiltered natural scene images (5° of visual angle) were briefly presented (100 msec) centrally on a computer screen. Participants were required either to respond when a natural scene was presented (yes/no detection task) or to indicate if the stimulus was a city or a highway (categorization task).

Results: The three groups showed similar accuracy levels but significant differences were observed in response times. More precisely, left hemianopes were impaired both in the detection and in the categorization tasks whereas right hemianopes were only impaired in the categorization task. However, the three groups had similar responses to spatial frequencies: HSF were processed more slowly than LSF.

Conclusions: Overall these results suggest that central vision is not intact in hemianopia. Lesion side selectively affects reaction times (RTs) in the detection and the categorization tasks, but does not seem to determine a specific deficit in spatial frequency processing.

© 2009 Elsevier Srl. All rights reserved.

* Corresponding author. ERT TREAT Vision, CNRS UMR 5105, Fondation Ophtalmologique Rothschild, 25, rue Manin, 75019 Paris, France.
E-mail address: sylvie.chokron@gmail.com (S. Chokron).

0010-9452/\$ – see front matter © 2009 Elsevier Srl. All rights reserved.
doi:10.1016/j.cortex.2009.08.013

1. Introduction

Visual analysis starts with an extraction of elementary information at different spatial scales/frequencies (for review, Basole et al., 2006), usually segregated as Low and High Spatial Frequencies (LSF and HSF, respectively). Experimental data from psychophysics (Ginsburg, 1986), functional neuroanatomy of magnocellular and parvocellular pathways (Van Essen and DeYoe, 1995) and ultra rapid categorization in humans and monkeys (Fabre-Thorpe et al., 1998) confirm the idea that visual analysis starts with a parallel extraction of different elementary visual attributes at different spatial scales or frequencies, with a coarse-to-fine processing design (Schyns and Oliva, 1994). According to this design, a rapid extraction of LSF should provide a global outlook of a stimulus structure, thus allowing an initial perceptual categorization. This perceptual categorization should be refined, confirmed or informed by the information conveyed by HSF whose extraction takes place later (Ginsburg, 1986; Hughes et al., 1996; Schyns and Oliva, 1994). Coherent with this hypothesis some authors have proposed that LSF conveyed by the magnocellular pathway reach higher order cortical areas (parietal and temporal cortices) more rapidly than HSF conveyed by the parvocellular pathway (for further details, see Bullier, 2001). Moreover, numerous behavioural and functional imagery studies using lateralized presentation of altered visual stimuli among healthy individuals as well as brain-damaged patients indicated that there could be a hemispheric asymmetry for LSF and HSF processing (Fink et al., 1996, 1997, 2000; Heinze et al., 1998; Robertson et al., 1988; Sergent, 1982; Wilkinson et al., 2001; Yamaguchi et al., 2000). These data revealed a left visual field/right hemisphere advantage for LSF yet a right visual field/left hemisphere advantage for HSF. This asymmetry takes the form of shorter response times (RTs, of about 30 msec) when detecting LSF in the left than in the right visual field as well as HSF in the right than in the left visual field (see for example, Peyrin et al., 2003). This asymmetry has been reported both for gratings of different spatial frequencies (Jonsson and Helge, 1986) and for filtered images of natural scenes (Peyrin et al., 2003, 2004). However, it seems sensitive to a wide range of factors, including task instructions (Oliva and Schyns, 1997) or time presentation (Peyrin et al., 2006a). In addition, some studies also report a general left visual field (right hemispheric dominance) advantage for visual processing whatever the spatial frequencies of the stimulus (e.g., Kitterle et al., 1990; Peyrin et al., 2006b) suggesting that although both hemispheres do not use exactly the same type of visual information, the right hemisphere may be more sensitive to all spatial frequencies (Rebai et al., 1998).

Visual processing has been extensively studied regarding hemispheric asymmetries for spatial frequencies in associative cortices and less research has focused on asymmetries regarding the occipital cortex, notably in cerebral stroke patients. Yet, as underlined by Peyrin et al. (2006b), a population of choice to evaluate the implication of the each occipital lobe in visual processing is the one of patients suffering from a Homonymous Hemianopia (HH) following unilateral occipital damage (or a post-chiasmatic lesion). This disorder, in which patients are blind to the contralesional

visual field, is particularly disabling regarding visual memory (e.g., Kerkhoff, 2000) but also results in significant deficits in activities of daily living. For example, impairments in visual exploration often result in the discontinuation of driving (Tant et al., 2002). Reading has also been found to be affected in these patients. These hemianopic patients show slowed reading, make several errors, or can even suffer from alexia (e.g., Leff et al., 2006). Given that reading relies largely on the central, detailed vision, it is likely that hemianopic patients experience impairments not only in their contralesional visual field but in their central visual field as well. Yet it is the central and the ipsilesional visual fields of these patients that are usually used in clinical practice and rehabilitation to compensate for their contralesional deficit (see for discussion Chokron et al., 2008). In spite of the classic assumption that these visual fields are perceptually unaffected in hemianopic patients, vision may not be fully intact. For example, it has recently been shown that hemianopic patients are impaired in detecting figures presented in their "intact" visual field (Paramei and Sabel, 2008). Regarding the asymmetry for spatial frequency processing, and thus for the nature of the underlying information, the Paramei et al. study also raises the question of the quality of global and local information processing in the central visual field.

The goals of the present study were three-fold. First we wanted to evaluate the quality of central vision in hemianopia. The scarce reports in the existing literature lead to suggest that there are some anomalies in the central visual field. Moreover, due to the right hemisphere superiority in visual processing (including the occipital lobe), impairments are expected to be greater in left hemianopic/right cerebral stroke patients. Second, we aimed to assess the effect of a lateralized occipital injury on cerebral asymmetry for spatial frequency processing. We expected to observe an LSF processing deficit in left hemianopic patients (with a right occipital lesion), but an HSF processing deficit in right hemianopic patients (with a left occipital lesion) in regard to the occipital asymmetry reported in imaging studies (e.g., Peyrin et al., 2004). Given the fact that at a behavioural level, such asymmetry can be observed when stimuli are presented in lateral visual fields (e.g., Peyrin et al., 2003) and because our study used central presentation, this asymmetry for spatial frequency processing could be attenuated. Finally, the task constraint effects were also evaluated using two tests: detection and categorization tasks of natural scenes images. Detection is the process of finding out the existence of a body or a hidden phenomenon; experimentally, it requires deciding on the presence of an object. Categorization is the ability to discretize physical reality by creating classes containing objects of similar nature; experimentally, it asks to assign exemplars to its corresponding category. According to Kitterle et al. (1990), hemispheric differences are more often found in the identification, but not the detection, of LSF versus HSF. Due to the right hemisphere superiority for visuospatial processing (e.g., Benton and Tranel, 1993), we expected left hemianopic/right cerebral stroke patients to be impaired in both tasks and to a larger extent in the detection task (Peyrin et al., 2006b). However, due to the supposed specialization of the left hemisphere for categorization (Kitterle et al., 1990) we

expected right hemianopic/left cerebral stroke patients to be specifically impaired in the categorization task.

2. Material and methods

2.1. Participants

Eleven brain-damaged men with isolated HH from unilateral post-chiasmatic lesion were recruited for this study. Diagnoses were confirmed with a visual field examination (Humphrey automatic perimetry 24-2, SITA-FAST program) with individual results presented in the Fig. 1. Six of them presented a right visual field defect following left brain damage (right homonymous hemianopia-left brain damage – RHH-LBD group; mean age: 61.04 ± 9.94 years; mean educational level: 13.67 ± 5.09 years), and the remaining five were left hemianopic patients following right brain damage (left homonymous hemianopia-right brain damage – LHH-RBD group; mean age: 67.33 ± 10.68 years; mean educational level: 7.80 ± 4.76 years). None of them suffered from confusion, general mental deterioration, or psychiatric disorders. Twenty-five healthy men (mean age: 60.50 ± 12.14 years; mean educational level: 13.76 ± 3.90 years) constituted the control group.

All participants were right-handed, had normal or corrected-to-normal visual acuity, and completed a consent form before entering the study. Moreover, contrast sensitivity of all but 2 patients (right hemianopes) was assessed using the Pelli-Robson chart. Individual scores were similar to those previously reported in a group of aged healthy participants [Hirvela et al., 1995; RHH-LBD group: mean (M) \pm standard deviation (SD): $1.80 \pm .07$; range: 1.65–1.95; LHH-RBD group: $M \pm SD$: $1.86 \pm .14$; range: 1.65–1.95]. The three groups were matched regarding their age (one-way analysis of variance – ANOVA, $p > .05$) and sex (see Table 1 for details). Nevertheless, a

significant group effect was observed regarding the mean educational level [$F(2,33) = 4.29$; $p < .05$]. Indeed, the LHH-RBD group had a lower educational level than both other groups (post-hoc, LSD test; both $p < .05$). Finally, lesion extent, evaluated through lesion volume [calculated from T1 weighted Magnetic Resonance Imaging (MRI) scans] was similar in both groups (RHH-LBD: 22.61 ± 23.97 cm³; LHH-RBD: 12.04 ± 8.32 cm³). Regarding lesion sites, patients were very similar except for one left hemianope (patient 5). In both groups, cerebral stroke was localized in the occipital lobe (BA17 in all but one patient; BA18 in 5 right hemianopes and 4 left hemianopes; BA19 in 3 right hemianopes and 2 left hemianopes) and extended in the temporal horn (BA20 or BA21) and the fusiform gyrus (BA37), or even the angular gyrus (BA39) in two right hemianopic patients (patients 7 and 10). The one particular patient (patient 5) was a left hemianope showing a lesion largely extending in the temporal lobe (BA20–22, 26, 41, 42, and 48) and resulting from a meningioma resection.

2.2. Material

Stimuli were 8 black-and-white photographs (256×256 pixels) of natural scenes (6 cities and 2 highways, mean luminance of 122 and 123 respectively, on a grey-level scale; see Fig. 2a) selected from the database of natural scene images of the Computational Visual Cognition Laboratory (available online at <http://cvcl.mit.edu/database.htm>). In addition to these eight greyscale pictures (256 grey-level), two identical, grey images were built as null stimuli (see Fig. 2e) which made a total of 10 images. Angular size of all stimuli was fixed at 4° of visual angle. From each natural scene image, two additional stimuli were created, an LSF and an HSF-filtered scene images (see Fig. 2d). Spatial frequency content of scenes was filtered by multiplying the Fourier transform of original images by Gaussian filters. The SD of the Gaussian filter is a function of the spatial frequency cut-off, for a standard attenuation of

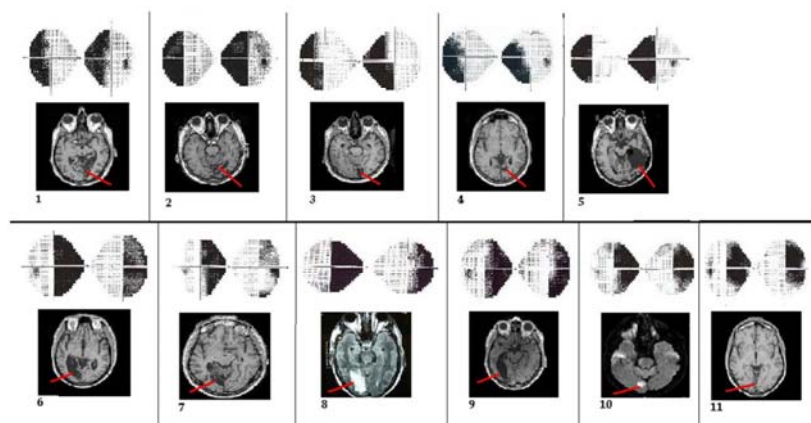


Fig. 1 – Visual field examination (Humphrey automated perimetry, 24-2, SITA-FAST program) and scan images (axial slice) of the 5 left hemianopic (top lines) and the 6 right hemianopic (bottom lines). On the scan images, the arrow indicates lesion site.

Table 1 – Demographic and clinical details of each hemianopic patient and of the control group.

	Age (years)	Educational level (years)	Lesion aetiology	Lesion location	Lesion volume (cm ³)	Time interval from lesion (months)	Macular sparing
LHH-RBD group							
Patient 1	70.01	5	Ischemia	BA17–19	11.47	34	Partial
Patient 2	78.90	5	Infarct	BA17–19	21.27	24.79	None
Patient 3	71.05	5	Ischemia	BA17, 18	14.22	21.20	Partial
Patient 4	49.90	8	Ischemia	BA17	1.21	25.30	Full
Patient 5	71.05	5	Surgery (meningioma)	BA20–22, 36, 41, 42, 48 and thalamus (posterior)	57.70	21.20	None
Mean (±SD)	67.33 (±10.68) ^a	7.80 (±4.76) ^b	–	–	21.17 (±21.65) ^c	55.52 (±65.46) ^c	–
RHH-LBD group							
Patient 6	48.11	14	Ischemia	BA17	.93	9.73	None
Patient 7	59.85	17	Ischemia	BA17–20, 37	51.00	28.23	Partial
Patient 8	56.75	12	Ischemia	BA17–19	17.80	36.00	None
Patient 9	56.25	20	Haemorrhage	BA17, 18	8.76	2.40	None
Patient 10	69.90	7	Haemorrhage	BA17–19, 21, 37, 39	54.20	30.43	None
Patient 11	75.39	5	Ischemia	BA17, 18	3.00	17.50	None
Mean (±SD)	61.04 (±9.94) ^a	13.67 (±5.09) ^b	–	–	22.61 (±23.97) ^c	20.71 (±13.05) ^c	–
Control group (n = 25)	60.50 (±12.14) ^a	13.76 (±3.90) ^b	–	–	–	–	–

SD: Standard deviation.

a Non significant difference (ANOVA).

b Significant group effect [ANOVA, $F(2,33) = 4.29$; $p < .05$]; the LHH-RBD group had a lower educational level than both other groups.

c Non significant difference between both patients groups (t-test).

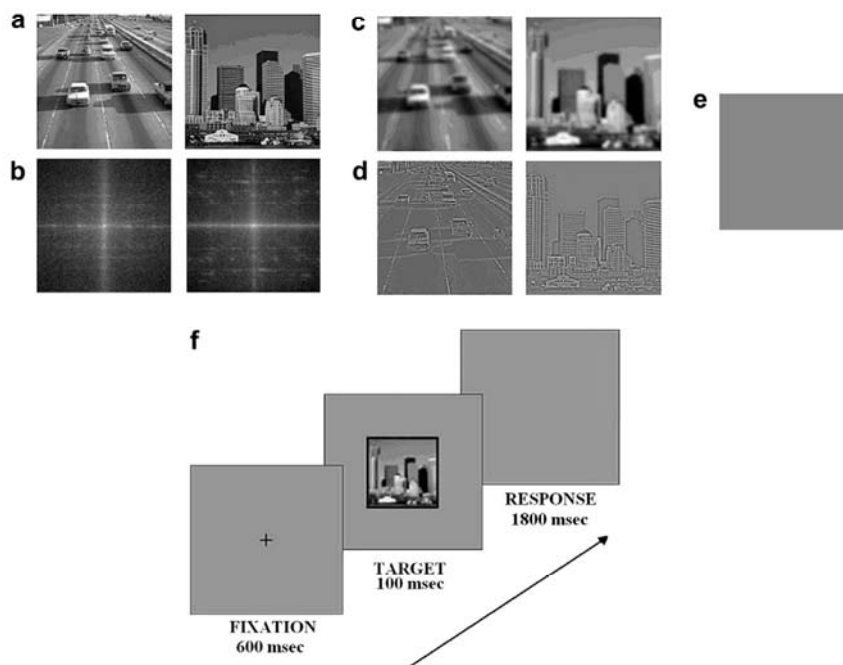


Fig. 2 – (a) Examples of scene images of each category (highway and city) used both in the discrimination and categorization tasks and **(b)** the mean amplitude spectra of each category. Each image was filtered in **(c)** low spatial frequencies (LSF, <4 cycles/degree) and **(d)** high spatial frequencies (HSF, >6 cycles/degree). **(e)** Null stimulus. **(f)** Time course of each trial: within a trial, a fixation cross was first presented centrally for 600 msec; then the stimulus appeared for 100 msec, and was finally followed by a grey screen lasting for 1800 msec while the participant pressed a button to give his/her response.

3 dB. We removed the spatial frequency content above 4 cycles per degree of visual angle (i.e., low-pass cut-off of 16 cycles per image) for LSF scene images and below 6 cycles per degree of visual angle (i.e., high-pass cut-off of 24 cycles per image) for HSF scenes images. In order to create stimuli that did not bias visual processing the total energy for LSF and HSF images was equalized for each scene³ (for further details, see Peyrin et al., 2006a, 2006b; see Fig. 2b for illustration). All images (including null stimuli) were presented surrounded with a black frame so their final size was 264 × 264 pixels. From here, 3 blocks, each including the 6 cities, the 2 highways, and the 2 null stimuli, were elaborated: one block with non-filtered (NF) images, one block with LSF-filtered images,

and one block with HSF-filtered images. Each block was repeated 4 times which made a total of 12 blocks per task.

2.3. Procedure

Participants sat facing the centre of a 19-inch computer monitor (1024 × 768 resolution) at a distance of 100 cm, in a dark room. This way images covered 5° of visual angle. They were presented centrally on a grey background screen via the E-Prime software (E-prime Psychology Software Tools Inc., Pittsburgh, USA). A trial (illustrated in Fig. 2f) was composed of a central fixation cross (presented for 600 msec), an image (presented for 100 msec) and a grey response screen (presented for 1800 msec).

Participants were required to perform two tasks. In the detection task they were instructed to press a button when the black frame was filled in with an image (either a city or a highway) and another one when it was the null stimulus. In the categorization task, they had to press a button when a city was presented and another one when a highway or a null stimulus was presented in the black frame. The terminology of detection and categorization was chosen because:

³ The energy level for LSF and HSF stimuli was equalized for each scene as follow: If $LSF(i, j)$ and $HSF(i, j)$ represent the value of the pixel at position (i, j) of respectively the low and the high-pass filtered images of a scene, their energies are given by $E_{LSF} = \sum_{i,j} LSF(i, j)^2$ and $E_{HSF} = \sum_{i,j} HSF(i, j)^2$. The average energy between LSF and HSF stimuli is then given by $E_{AVR} = (E_{LSF} + E_{HSF})/2$. The stimuli are then normalized by the average energy, $LSF_{norm}(i, j) = LSF(i, j)E_{AVR}/E_{LSF}$ and $HSF_{norm}(i, j) = HSF(i, j)E_{AVR}/E_{HSF}$.

i) it suggests a greater language implication in the second than in the first task, consistent with tasks instructions; ii) in literature about blindsight (i.e., the ability to act, without awareness, on contralesional stimuli), authors tend to distinguish detection tasks, in which participant has to decide if a stimulus is present or not, from other types of “forced-choice” tasks (e.g., Stoerig et al., 2002); iii) studies of blindsight phenomenon (e.g., Stoerig, 2006) highlighted that primary visual areas are necessary to complete a simple detection task (because hemianopic patients are unable to detect simple stimuli presented in their contralesional visual field), but they are implicated to a lesser degree in a “forced-choice” task, such as our categorization task (because hemianopic patients can be able to make a decision about stimuli presented in their contralesional blind visual field). Participants gave their responses by pressing a button of an SR-BOX aligned on the mid-sagittal plane of each participant. The forefinger and the middle finger of their right hand were used to respond. The order of tasks and the fingers used to respond were counterbalanced across participants within each group. The quality of the central fixation was controlled by the experimenter only during the tasks. Nevertheless, stimuli were presented aligned on the central fixation cross, on the centre of the screen. Moreover, stimuli presentation duration was 100 msec. Such duration extremely reduced visual exploration as reflexive saccades can appear about 100 msec after stimulus onset and voluntary saccades only appear about 200 msec after stimulus onset (for review, Findlay and Gilchrist, 2003). Furthermore, results of each patient for the visual field examination, during which they are required to fixate on a central cross, did not highlight any significant loss of fixation (all examinations were interpretable).

2.4. Data analysis

Responses and RTs (in msec) were recorded. Accuracy was evaluated through the error rate (ER, percentage of correct responses). ER and RT were individually analyzed using a two-way ANOVA with the three groups (controls, LHH-RBD, and RHH-LBD) as a between-subjects factor, and tasks (detection and categorization) and spatial frequencies (NF, LSF, and HSF) as within-subjects factors. When necessary, the specific effect of each factor was analyzed with post-hoc analysis (LSD test). All statistics were performed by the Statistica software package (release 5.1, 1997), and the alpha-set level was fixed at 5%. In the results section, Ms and SDs are presented.

3. Results

3.1. ER

ER analysis did not reveal significant main effects or interactions. All conditions confounded, the three groups showed a low ER (controls: $M = 2$, $SD = 6\%$; LHH-RBD: $M = 2$, $SD = 3\%$; RHH-LBD: $M = 1$, $SD = 2\%$) which did not vary between detection and categorization tasks, or following the spatial frequencies presented.

3.2. Response time (RT)

Data are presented in Table 2. RT analysis showed three main effects and one significant interaction. The main group effect [$F(2,33) = 5.75$; $p < .01$] results from significant longer RTs in LHH-RBD patients ($M = 603.46$, $SD = 111.66$ msec) compared to controls ($M = 482.71$, $SD = 95.27$ msec; post-hoc analysis, LSD test, $p < .01$). The main task effect [$F(1,33) = 104.43$; $p < .001$], highlights that the detection task ($M = 446.87$, $SD = 88.26$ msec) induced significantly faster responses than the categorization task ($M = 565.69$, $SD = 98.26$ msec).

However these main effects were modulated by a significant group \times task interaction, [$F(2,33) = 4.90$; $p < .05$]. As illustrated in Fig. 3, although the three groups had shorter RTs in the detection task than in the categorization task (all detection/categorization comparisons were significant; post-hoc analysis, LSD test, $p < .001$), the group effect was not similar in both tasks. In the detection task RTs of LHH-RBD patients ($M = 545.75$, $SD = 102.52$ msec) were significantly longer than controls' RTs ($M = 431.65$, $SD = 75.52$ msec; post-hoc analysis, LSD test, $p < .001$) or RHH-LBD patients' RTs ($M = 427.87$, $SD = 74.28$ msec; post-hoc analysis, LSD test, $p < .001$). RHH-LBD patients and controls did not differ in the detection task. In the categorization task, controls' RTs ($M = 533.76$, $SD = 85.38$ msec) were again significantly shorter than LHH-RBD patients' RTs ($M = 661.17$, $SD = 90.45$ msec; post-hoc analysis, LSD test, $p < .001$); however this time controls' RT was also significantly shorter than RHH-LBD patients' RTs ($M = 619.16$, $SD = 82.07$ msec; post-hoc analysis, LSD test, $p < .001$). LHH-RBD and RHH-LBD RTs were not significantly different.

Finally, there was a main effect of spatial frequency [$F(2, 66) = 9.86$; $p < .001$] with HSF-filtered images leading to

Table 2 – Mean response times (msec) \pm SD of the three groups in the detection and categorization tasks with LSF, HSF, and NF-images.

		Control group (n = 25)	RHH-LBD group (n = 6)	LHH-RBD group (n = 5)	All group confounded
Detection task	LSF	421.23 \pm 66.08	431.60 \pm 70.88	536.65 \pm 110.62	438.99 \pm 81.90
	HSF	450.98 \pm 79.26	441.99 \pm 92.10	574.94 \pm 82.18	466.70 \pm 90.81
	NF	422.75 \pm 79.71	410.00 \pm 67.94	525.68 \pm 126.97	434.92 \pm 90.81
Categorization task	LSF	539.18 \pm 84.67	618.54 \pm 73.11	653.90 \pm 114.27	568.30 \pm 96.19
	HSF	532.31 \pm 94.64	647.54 \pm 109.32	665.35 \pm 93.23	569.99 \pm 110.40
	NF	539.79 \pm 79.37	591.65 \pm 61.04	664.26 \pm 82.37	558.78 \pm 89.46
All conditions confounded		482.71 \pm 95.27	523.51 \pm 123.94	603.46 \pm 111.66	

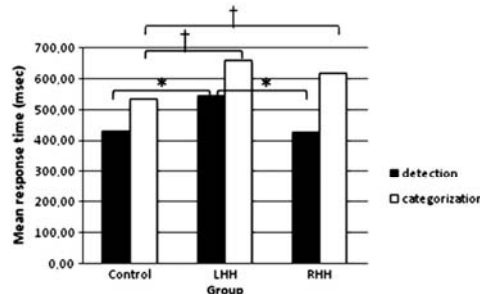
significantly longer RTs than LSF or unfiltered images (post-hoc analysis, LSD test, both $p < .001$).

3.3. Complementary analyses

To ensure the observed difference between both patients groups did not result from a difference in lesion site between patient 5 and other patients, we ran complementary analyses excluding patient 5. The new analyses indeed led to very similar results. Regarding ER, as above described, no significant main effect or interaction was observed. Regarding RT, although the main group effect did not reach significance anymore [$F(2,32) = 3.17$; $p = .055$], we still observed a main task effect [$F(1,32) = 88.08$; $p < .001$], a main spatial frequency effect [$F(2,64) = 12.52$; $p < .001$], and a group \times task interaction [$F(2,32) = 4.81$; $p < .05$]. Post-hoc analyses (LSD test) showed that, as in the previous analysis: i) RT to HSF was longer than either to LSF or NF; ii) the RHH-LBD group had similar RT as the control group in the detection task but had longer RT than controls in the categorization; iii) the LHH-RBD group had longer RT than the control group both in the detection and the categorization task. Notwithstanding, in the detection task the difference between right and left hemianopes no longer reached significance (LSD test, $p = .08$). Altogether, to exclude patient 5 did not fundamentally modify our results.

4. Discussion

To assess the quality of central vision in hemianopia, detection and categorization tasks of natural scene images (filtered or not) were performed by RHH-LBD and LHH-RBD patients.



*: Significant group differences ($p < .05$; ANOVA and post-hoc analyses) in the detection task;

†: Significant group differences ($p < .05$; ANOVA and post-hoc analyses) in the categorization task.

Fig. 3 – Mean response times (RTs, msec) observed in each group (healthy controls, left and right hemianopic patients [LHH-RBD and RHH-LBD]) and in each task (detection and categorization). In the detection task, left hemianopic patients had longer response times compared to both healthy controls and right hemianopic patients. On the other hand, in the categorization task, healthy controls had shorter response times than both left and right hemianopic patients.

Differential deficits were expected in these two populations since an early hemispheric asymmetry has been proposed for visual processing. Although our initial predictions were not fully confirmed, we indeed observed different patterns of impairment in these populations regarding their RT.

Compared to healthy controls, LHH-RBD patients showed longer response times in both task, whereas RHH-LBD patients showed longer response times only in the categorization task. This result supports previous studies showing a greater involvement (especially in terms of response times) of the right occipital cortex in passive vision (e.g., Grabowska et al., 1992), and, in general, greater sensitivity of the right hemisphere for visual characteristics (e.g., Rebaï et al., 1998; Peyrin et al., 2006b).

Comparison between detection and categorization tasks showed longer response times in the categorization task than in the detection task. Logically, the higher cognitive demand in the categorization task involves more sophisticated information processing, which in turn leads to more delayed responding.

The significant group \times task interaction led us to modify the previous interpretations. In the detection task, LHH-RBD patients had longer response times than healthy controls whereas RHH-LBD patients had similar response times as controls. However, in the categorization task, both patient groups had similar response times which were longer than those of healthy controls. On the one hand, a left-sided lesion mainly alters categorization abilities; on the other hand, a right-sided lesion significantly alters both detection and categorization abilities. This dissociation is consistent with recent studies showing that detection and categorization are not intrinsically related and do not rely on the exact same mechanisms (Bowers and Jones, 2008; Mack et al., 2008). Nevertheless, results in the LHH-RBD group could contradict such an assumption and are indeed closer to other studies showing a temporal coupling or a common mechanism between detection and categorization (Grill-Spector and Kanwisher, 2005).

In the end, our data could reconcile these contradictory hypotheses by considering the hemispheric asymmetry in these processes. One can consider that detection and categorization rely only in part on similar mechanisms and do not implicate both hemispheres in the same way. A left hemisphere lesion induces mainly a deficit in the categorization task, whereas a right hemisphere lesion induces a deficit in both the detection and the categorization tasks. Compared to the left hemisphere lesion effect, the data suggest that the right hemisphere is preferentially implicated in detection abilities. Regarding categorization, our data suggest a preferential implication of the left hemisphere but also a contribution of the right hemisphere. The right hemisphere lesion defect could be interpreted as resulting from an alteration before, during, or after the processing within the left hemisphere. In the first case, the right hemisphere lesion alters detection processes within the right hemisphere (i.e., the left hemisphere uses a degraded or delayed information to complete the categorization). In the second case, the right hemisphere lesion alters the left hemisphere functioning in itself. In the last case, the right hemisphere lesion induces an alteration of the final steps of the processing necessary in

a categorization task (e.g., through the elaboration of the response). Although this last assumption is particularly consistent in regard of the predominant role of the right hemisphere in visuo-attentional tasks further studies are obviously needed to conclude about the exact role of this hemisphere in categorization.

Regarding spatial frequency processing, only a main effect was observed. Overall, participants were slower to respond to HSF than to LSF or to NF images. In other words, LSF are sufficient to allow scene detection and categorization, as previously reported for categorization task (e.g., Guyader et al., 2004). Moreover, LSF are processed faster than HSF. There is a coarse-to-fine time course for spatial frequencies. Although it confirms a previous report for scene recognition in healthy individuals (e.g., Schyns and Oliva, 1994), our study suggests that hemianopic patients present the same time course than controls in spite of their unilateral occipital lesion. This assumption is supported by the lack of any significant interaction with the spatial frequencies factor. However, this lack of interaction challenges the classical view of an early hemispheric asymmetry for spatial frequency processing. Specifically, our results for LHH-RBD patients are in direct contradiction to the study by Peyrin et al. (2006b) that showed a larger impairment in LSF scene recognition in one left hemianopic patient. Nevertheless, some methodological considerations could explain the difference between our study and Peyrin et al. report. First, we assessed central vision whereas they assessed the intact visual field of their patient. Second, all but one patient received clinical rehabilitation for several months before entering this study whereas the hemianopic patient of Peyrin et al. was evaluated only 6 months after surgery (see Chokron et al., 2008 for precision on the rehabilitation programme). Moreover, this last point may explain our overall lack of specific deficit for spatial frequencies in hemianopic patients. Actually, the patients of the present study received regular practice for their hemianopia and were thus trained to detect, report, or localize stimuli presented in their blind field while fixating on a central point. Thus, this visual training could have improved spatial processing in hemianopic patients and masked the specific deficit induced by the lateralized lesion. Nonetheless, further studies are necessary to determine if the cerebral reorganisation underlying some visual recovery could explain this negative result.

Altogether, our results highlight that a HH consecutive to a post-chiasmatic lesion is associated to a specific deficit in detection or categorization abilities depending on the lesion side. Specifically, a lesion of the right visual areas will mainly induce a specific deficit in detection abilities whereas a lesion of the left visual areas will mainly induce a specific deficit in categorization abilities. In the end, the central visual field of hemianopic patients may not be as intact as one can assume and should benefit from a specific rehabilitation to ensure better use in everyday tasks.

Acknowledgements

This research was supported by the Edmond and Benjamin de Rothschild Foundations (Geneva and New York).

REFERENCES

- Basole A, Kreft-Kerekes V, White LE, and Fitzpatrick D. Cortical cartography revisited: A frequency perspective on the functional architecture of visual cortex. *Progress in Brain Research*, 154: 121–134, 2006.
- Benton A and Tranel D. Visuo-perceptual, visuo-spatial, and visuo-constructive disorders. In Heilman KM and Valenstein E (Eds), *Clinical Neuropsychology*. 3rd ed. 1993: 165–213.
- Bowers JS and Jones KW. Detecting objects is easier than categorizing them. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61: 552–557, 2008.
- Bullier J. Integrated model of visual processing. *Brain Research Review*, 36: 96–107, 2001.
- Chokron S, Perez C, Obadia M, Gaudry I, Laloum L, and Gout O. From blindsight to sight: Cognitive rehabilitation of visual field defects. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 26: 305–320, 2008.
- Fabre-Thorpe M, Richard G, and Thorpe SJ. Rapid categorization of natural images by rhesus monkeys. *NeuroReport*, 9: 303–308, 1998.
- Findlay JM and Gilchrist ID. Visual orienting. In *Active Vision: The Psychology of Looking and Seeing*. Oxford: Oxford University Press, 2003: 55–81.
- Fink GR, Halligan PW, Marshall JC, Frith CD, Frackowiak RS, and Dolan RJ. Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature*, 382: 626–628, 1996.
- Fink GR, Marshall JC, Halligan PW, Frith CD, Frackowiak RS, and Dolan RJ. Hemispheric specialization for global and local processing: The effect of stimulus category. *Proceedings in Biological Sciences*, 264: 487–494, 1997.
- Fink R, Marshall JC, Halligan PW, and Dolan RJ. Neuronal activity in early visual areas during global and local processing: A comment on Heinze, Hinrichs, Scholz, Burchert and Mnagun. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12: 355–356, 2000.
- Ginsburg AP. Spatial filtering and visual form perception. In Boff K, Kaumann L, and Thomas J (Eds), *Handbook of Perception and Human Performance*. New York: Wiley, 1986: 1–41.
- Grabowska A, Nowicka A, and Szatkowska I. Asymmetry in visual evoked potentials to gratings registered in the two hemispheres of the human brain. *Acta Neurobiologica Experimentalis*, 52: 239–249, 1992.
- Grill-Spector K and Kanwisher N. Visual recognition: As soon as you know it is there, you know what it is. *Psychological Science*, 16: 152–160, 2005.
- Guyader N, Chauvin A, Peyrin C, Hérault J, and Marendaz C. Image phase or amplitude? Rapid scene categorization is an amplitude based process. *Comptes Rendus Biologie*, 327: 313–318, 2004.
- Heinze HJ, Hinrichs H, Scholz M, Burchert W, and Mangun GR. Neural mechanisms of global and local processing. A combined PET and ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10: 485–498, 1998.
- Hirvela H, Koskela P, and Laatikainen L. Visual acuity and contrast sensitivity in the elderly. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 73: 111–115, 1995.
- Hughes HC, Nozawa G, and Kitterle F. Global precedence, spatial frequency channels, and the statistics of natural images. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8: 197–230, 1996.
- Jonsson J and Helge J. Lateralized effects of blurring: A test of the visual spatial frequency model of cerebral hemisphere asymmetry. *Neuropsychologia*, 24: 351–362, 1986.
- Kerkhoff G. Neurovisual rehabilitation: Recent developments and future directions. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 68: 691–706, 2000.
- Kitterle F, Christman S, and Hellge JB. Hemispheric differences are found in the identification, but not in the detection task, of

- low versus high spatial frequencies. *Perception Psychophysics*, 48: 297–306, 1990.
- Leff AP, Spitsyna G, Plant GT, and Wise RJ. Structural anatomy of pure and hemianopic alexia. *Journal Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, 77: 1004–1007, 2006.
- Mack ML, Gauthier I, Sadr J, and Palmeri TJ. Object detection and basic-level categorization: Sometimes you know it is there before you know what it is. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15: 28–35, 2008.
- Oliva C and Schyns P. Coarse bolds or fine edges? Evidence that information diagnosticity changes the perception of complex visual stimuli. *Cognitive Psychology*, 34: 72–107, 1997.
- Paramei GV and Sabel BA. Contour-integration deficits on the intact side of the visual field in hemianopia patients. *Behavioural Brain Research*, 188: 109–124, 2008.
- Peyrin C, Chauvin A, Chokron S, and Marendaz C. Hemispheric specialisation for spatial frequency processing in the analysis of natural scenes. *Brain and Cognition*, 53: 278–282, 2003.
- Peyrin C, Baciou M, Segebarth C, and Marendaz C. Cerebral regions and hemispheric specialization for processing spatial frequencies during natural scene recognition. An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 23: 698–707, 2004.
- Peyrin C, Mermillod M, Chokron S, and Marendaz C. Effect of temporal constraints on hemispheric asymmetries during spatial frequency processing. *Brain and Cognition*, 62: 214–220, 2006a.
- Peyrin C, Chokron S, Guyader N, Gout O, Moret J, and Marendaz C. Neural correlates of spatial frequency processing: A neuropsychological approach. *Brain Research*, 1073–1074: 1–10, 2006b.
- Rebaï M, Bernard C, Lannou J, and Jouen F. Spatial frequency and right hemisphere: An electrophysiological investigation. *Brain Cognition*, 36: 21–29, 1998.
- Robertson LC, Lamb MR, and Knight RT. Effects of lesions of temporal-parietal junction on perceptual and attentional processing. *Journal of Neuroscience*, 8: 3757–3769, 1988.
- Schyns PG and Oliva A. From blobs to boundary edges: Evidence for time- and spatial-scale-dependant scene recognition. *American Psychological Society*, 54: 195–200, 1994.
- Sergent J. The cerebral balance of power: Confrontation or cooperation? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8: 253–272, 1982.
- Stoerig P. Blindsight, conscious vision, and the role of the primary visual cortex. *Progress in Brain Research*, 155: 217–234, 2006.
- Stoerig P, Zontanou A, and Cowey A. Aware or unaware: Assessment of cortical blindness in four men and a monkey. *Cerebral Cortex*, 12: 565–574, 2002.
- Tant MLM, Brouwer WH, Cornelissen FW, and Kooijman AC. Driving and visuospatial performance in people with hemianopia. *Neuropsychological Rehabilitation*, 12: 419–437, 2002.
- Van Essen DC and DeYoe EA. Concurrent processing in the primate visual cortex. In Gazzaniga MS (Ed), *The Cognitive Neurosciences*. Cambridge, MA: MIT Press, 1995: 383–400.
- Wilkinson DT, Halligan PW, Marshall JC, Büchel C, and Dolan RJ. Switching between the forest and the trees: Brain systems involved in local/global changed-level judgments. *NeuroImage*, 13: 56–67, 2001.
- Yamaguchi S, Yamagata S, and Kobayashi S. Cerebral asymmetry of the “top-down” allocation of attention to global and local features. *Journal of Neuroscience*, 20: RC72, 2000.

3. Discussion

Pour s'assurer de l'intégrité du champ visuel central chez les patients hémianopsiques droit (cérébro-lésés gauche) et gauche (cérébro-lésés droit) nous leur avons proposé une tâche avec soit une consigne de détection et soit de catégorisation de scènes naturelles (filtrées en fréquences spatiales ou non) en champ central. En nous appuyant sur la littérature mettant en évidence une asymétrie hémisphérique dès les aires corticales de bas niveau tel que le cortex visuel primaire, nous supposions obtenir un pattern de performances différent selon la latéralisation de la lésion. Les résultats obtenus ne vont pas réellement dans le sens de nos hypothèses *a priori*, mais malgré cela, si l'on considère les TR, les performances obtenues par les deux groupes de patients diffèrent.

Les patients HLHg (cérébro-lésés droit) obtiennent des TR plus lents que les contrôles, et ce quelle que soit la consigne (détection et catégorisation). Alors que les patients HLHd (cérébro-lésés gauche) obtiennent des TR plus lents que les contrôles uniquement lorsqu'ils effectuent la tâche avec la consigne de catégorisation. Ces résultats vont dans le sens de ceux observés par Grabowska et *al.*, (1992) soulignant l'implication du cortex visuel droit lors d'une tâche de vision passive, et notamment pour les TR, mais également de l'implication plus importante de l'hémisphère droit pour ce qui concerne le traitement visuel en général (Rebaï et *al.*, 1998 ; Peyrin et *al.*, 2006b).

La comparaison de la tâche réalisée sous deux consignes différentes permet de constater un TR plus important pour lors de la catégorisation par rapport à la détection. Ce résultat est peu surprenant, du fait de la demande cognitive plus importante lors de la catégorisation impliquant un traitement plus fin de l'information, qui par conséquent, demande un temps de traitement plus long.

L'interaction significative entre les facteurs Groupe X Consigne, nous a conduit à modifier nos premières interprétations. Concernant la détection, les patients HLHg (cérébro-lésés droit) obtiennent des TR plus lents que ceux obtenus par les participants contrôles alors que les patients HLHd (cérébro-lésés gauche) obtiennent des TR similaires à ceux obtenus par les participants contrôles. Cependant, pour la catégorisation, les deux groupes de patients (HLHd et HLHg) obtiennent des TR similaires, qui sont bien plus lents de ceux obtenus par les participants contrôles. Pour résumer : les patients souffrant d'une lésion occipitale gauche obtiennent des performances altérées lors de la catégorisation de scènes. Les patients souffrant d'une lésion occipitale droite obtiennent des performances

significativement altérées à la fois pour la détection et la catégorisation. Cette dissociation va dans le sens des résultats des deux études (Bowers et Jones, 2008 ; Mack et *al.*, 2008) montrant que la détection et la catégorisation sont des tâches très proches mais ne sont pas sous-tendues pour autant par les mêmes mécanismes. Néanmoins, les performances obtenues par le groupe de patients HLHd (cérébro-lésés gauche) dans notre étude, vont dans le sens inverse, et sont plus proches de ceux observés par Gill-Spector et Kanwisher, (2005) mettant en évidence des mécanismes communs entre la détection et la catégorisation. Selon l'hypothèse de Schyns et Oliva (1994), en fonction du type de tâche à réaliser, les stratégies du système visuel peuvent varier. L'objectif de cette étude est de pouvoir comparer la réalisation d'une tâche unique sous deux consignes différentes (paradigme identique, mais n'impliquant pas le même niveau de traitement induit par la consigne : de détection et de catégorisation).

Les taux d'erreurs des sujets dans cette tâche sont faibles quelle que soit la consigne. Ils n'ont pas répondu au hasard. De plus, les taux d'erreurs ne varient pas en fonction du type de la consigne, du groupe, ou du filtrage des images. Ceci implique qu'il n'est pas plus difficile, au niveau de la performance, de catégoriser une scène, que de la détecter, en vision centrale.

Néanmoins, si les sujets répondent correctement, les TR, eux, varient en fonction de la consigne donnée, avec des TR plus rapides, et des TE plus petits pour la détection. Il est possible que les participants aient des temps de traitement plus élevés en catégorisation, car c'est une tâche plus complexe, de haut niveau. La catégorisation nécessite un accès au sens, ce qui n'est pas le cas de la détection. De plus la stratégie des patients est certainement de répondre de façon correcte, car c'est ce qui leur est expressément demandé dans la consigne. Ils s'adaptent alors, en ralentissant leur TR, afin de permettre au cerveau de traiter parfaitement l'information avant de répondre. Il serait intéressant d'observer ce qu'il en est des TR, lorsque l'on ne contraint pas les participants à un objectif d'efficacité, mais seulement à un objectif de rapidité.

Ces résultats vont à l'encontre de ceux présentés par Grill-Spector et Kanwisher (2005). Ceux-ci montrent que la détection et la catégorisation d'objets impliquent des TR identiques, pourvu que la catégorisation se fasse à un niveau de base, du point de vue sémantique (ex : oiseau ou voiture). Ils observent des différences de TR, uniquement lorsque les objets sont catégorisés à un niveau sous ordonné (ex : pigeon ou moineau). On peut alors se demander si les villes et les autoroutes sont des niveaux sous-ordonnés de la catégorie « paysage » ?

Il se peut également que les scènes naturelles ne présentent pas les mêmes profils de résultats que les objets, car les scènes naturelles sont un ensemble de plusieurs objets, et que les objets sont présentés seuls. Il serait possible de comparer ces types d'images, en demandant par exemple aux sujets, de catégoriser des images de ville et de forêt, et par ailleurs d'identifier des images d'immeuble, et d'arbre.

Finalement, en considérant l'asymétrie hémisphérique pour ces processus, nos résultats peuvent réconcilier ces deux hypothèses opposées. Les résultats des patients HLHg (cérébro-lésés droit) vont dans le sens de l'hypothèse d'une spécialisation hémisphérique droite pour le traitement visuo-spatial (voir Corballis, 2003, pour revue). Une atteinte de l'hémisphère droit entraîne donc des difficultés majeures de traitement de l'information, à la fois en détection et en catégorisation. On peut supposer, que la détection et la catégorisation sont reliées en partie par des mécanismes communs et n'impliquent pas les deux hémisphères de la même manière.

Une lésion hémisphérique gauche produirait un déficit plus important lors de la réalisation de la catégorisation, alors qu'une lésion hémisphérique droite engendrerait un déficit à la fois pour la détection et la catégorisation.

Concernant le traitement des fréquences spatiales, d'un point de vue global, il apparaît que les images filtrées en HFS sont plus lentes à détecter et à catégoriser que les images filtrées en BFS ou NF. Ces résultats vont dans le sens d'un décours temporel plus rapide pour les BFS que pour les HFS. Ils concordent donc avec l'hypothèse *coarse-to-fine* décrite par Schyns et Oliva (1994). En fonction des facteurs Groupes et Consigne, nous retrouvons le biais *coarse-to-fine* dans les performances obtenues par les contrôles, mais uniquement lors de la détection.

En détection, bien qu'il s'agisse d'un processus de bas niveau, le système visuel se base déjà sur les fréquences spatiales pour identifier la présence d'une scène ou non. Ce décours temporel pourrait s'expliquer par le fait que les images filtrées en HFS, ressemblent plus aux plages grises des images neutres, que les images filtrées en BFS, qui présentent de larges plages de noir. Ainsi, elles seraient plus difficiles à traiter. Il se peut également que les sujets aient envisagé cette tâche de manière catégorielle.

Les mêmes profils de résultats apparaissent pour le groupe des patients HLHg (cérébro-lésés droit). De plus, il n'y a pas d'effet d'interaction entre la Consigne et le Groupe, lorsque l'on compare les patients HLHg (cérébro-lésés droit) et les sujets contrôles.

Les profils sont donc similaires pour les deux groupes. Les patients HLHg (cérébro-lésés droit) obtiennent des TR très ralentis dans l'ensemble. Il est donc difficile d'interpréter les résultats en termes de spécialisation hémisphérique pour certaines fréquences spatiales.

Dans l'ensemble, les hypothèses nous menaient à supposer une annulation du biais *coarse-to-fine* chez les patients HLHg (cérébro-lésés droit). En effet, une lésion à droite devrait entraîner une diminution de la prise en compte des BFS, au profit des HF. C'est le cas lors de la catégorisation, mais le profil similaire des sujets contrôles ne nous permet pas de conclure sur ce point.

Enfin, les patients HLHd (cérébro-lésés gauche) présentent des profils de résultats différents des autres groupes. En effet, leurs performances ne mettent pas en évidence de biais *coarse-to-fine* en détection. Les images filtrées entraînent globalement des TR plus lents que ceux obtenus pour les images NF. Ceci ne va pas dans le sens des hypothèses. Au regard des résultats des sujets contrôles, on pourrait s'attendre à une intensification du biais *coarse-to-fine* en détection. En revanche, pour la catégorisation, seules les images filtrées en HFS diffèrent des images NF. Les autres groupes ne présentant pas ce type de résultats, il se pourrait que celui-ci s'explique par l'atteinte spécifique de l'hémisphère gauche. Celle-ci pourrait entraîner un ralentissement dans le traitement des HFS, selon l'hypothèse de la spécialisation hémisphérique des FS.

Les performances obtenues par les patients HLHg (cérébro-lésés droit) sont en contradiction avec celles obtenues par une patiente HLHg (cérébro-lésée droit) présentée dans l'article de Peyrin et al. (2006b) mettant en évidence un déficit lors du traitement des scènes naturelles filtrées en BFS. Néanmoins, cette différence peut s'expliquer d'un point de vue méthodologique. Dans notre étude nous avons testé le champ visuel central alors que Peyrin et al., (2006b) ont testé le champ visuel sain de leur patiente. Tous les patients ayant participé à notre étude, étaient suivis en rééducation neurovisuelle (voir Chokron et al., 2008) alors que la patiente hémianopsique présentée par Peyrin et al., a été prise en charge en rééducation neurovisuelle seulement six mois après son intervention chirurgicale.

4. Conclusion

En vision centrale, le traitement de scènes naturelles est perturbé chez les patients hémianopsiques. Les patients HLHg (cérébro-lésés droit) semblent plus perturbés avec des TR globalement plus ralentis même pour la détection. En revanche, les patients HLHd

(cérébro-lésés gauche) sont aussi rapides que les sujets contrôles en détection, mais sont ralentis en catégorisation.

Les résultats sur le traitement des FS, dans cette étude, sont partiellement en accord avec les résultats de la littérature. Il existe un biais *coarse-to-fine* en détection, chez les sujets contrôles, mais ce biais disparaît en catégorisation.

Les profils de réponse des patients HLHg (cérébro-lésés droit) ne vont pas dans le sens d'une spécialisation hémisphérique pour le traitement des FS. Par contre, l'augmentation du biais *coarse-to-fine*, en catégorisation chez les patients HLHd (cérébro-lésés gauche), va dans le sens d'une spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement des HFS. Il serait intéressant de tester des sujets plus jeunes, car ces résultats mitigés pourraient s'expliquer par l'âge des patients. En effet, selon le modèle HAROLD (*hemispheric asymmetry reduction in older adults*), la spécialisation hémisphérique observée dans des tâches cognitives impliquant le cortex préfrontal, diminue avec l'âge (Cabeza, 2002 ; Dolcos, Rice et Cabeza, 2002). Il se pourrait que les mêmes résultats apparaissent au niveau postérieur du cortex.

Il semble intéressant de proposer ce protocole à des patients HLH ainsi qu'à des participants contrôles sous IRMf afin d'observer l'implication corticale lors de cette tâche de traitement de scènes naturelles sous l'influence de deux consignes (détection *vs* catégorisation), chez les contrôles et dans le cas de lésions occipitales droite et gauche (étude présentée PARTIE 3, chapitre 2).

Résumé

L'hémianopsie latérale homonyme (HLH) est l'amputation du champ visuel la plus fréquente à la suite d'une lésion cérébrale unilatérale. Elle se caractérise par une perte du champ visuel controlésionnel au niveau de chaque œil. La partie ipsilésionnelle du champ central est souvent utilisée pour compenser les difficultés rencontrées dans le champ visuel périphérique atteint. Cependant la qualité de la vision au sein du champ visuel central est peu connue dans l'HLH. Cette dernière est pourtant sollicitée dans les techniques de rééducation, comme une fonction intacte, permettant de compenser le déficit. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la qualité de la vision en champ central, à différents niveaux de traitement cérébral, chez des patients avec lésion occipitale unilatérale, souffrant d'Hémianopsie Latérale Homonyme (HLH) droite ou gauche.

Au regard de l'hypothèse de spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales (Peyrin, Chauvin, Chokron et Marendaz, 2003), nous avons exploré la possibilité d'une atteinte spécifique du traitement de certaines fréquences spatiales présentes dans l'image, ceci en fonction de la latéralisation de la lésion cérébrale des patients.

Nous avons comparé les performances et la rapidité des réponses de patients hémianopsiques, à celles de participants contrôles, dans une tâche utilisant des scènes naturelles (villes et autoroutes) avec une consigne de détection et une consigne de catégorisation. Les images sont filtrées en hautes fréquences spatiales, basses fréquences spatiales, ou non filtrées.

Pour les images de villes, les patients obtiennent des réponses similaires à celles obtenues par les participants contrôles. En revanche, chez les patients présentant une HLH gauche (cérébro-lésés droit) les temps de réponse obtenus sont plus longs, quelle que soit la tâche réalisée selon la demande de la consigne (détection *vs* catégorisation). Les patients présentant une HLH droite (cérébro-lésés gauche) obtiennent des temps de réponses plus longs uniquement pour la catégorisation.

Les résultats montrent que les patients ayant une lésion droite ont un traitement visuel significativement plus déficitaire que les autres groupes pour catégoriser et détecter des stimuli visuels en champ central. Néanmoins, la catégorisation est plus altérée chez les patients ayant une lésion gauche que chez les participants contrôles. Ces données mettent donc en évidence l'incidence d'une lésion occipitale sur le traitement visuel en champ central des patients hémianopsiques. La présence de troubles de l'analyse visuelle, plus marqués après lésion occipitale droite, renforce l'hypothèse d'une supériorité de l'hémisphère droit dans le traitement visuo-spatial. Ceci démontre que cette supériorité existe même lors du traitement de stimuli dans le champ visuel central.

Maintenant que nous avons observé les capacités visuelles à la fois de bas et de haut niveau cognitif, des patients HLH dans leur champ visuel central, nous pouvons alors aborder les capacités de reconnaissance de scène naturelle en champs latéralisés lors d'une tâche de détection et de catégorisation. Sachant que les performances obtenues par les patients HLH ne sont pas intègres en champ central on peut donc s'attendre à ce qu'elles soient également perturbées dans le champ visuel considéré comme sain : le champ ipsilatéral (à la lésion). Nous allons également évaluer les performances de détection et de catégorisation dans le champ visuel amputé, contralatéral à la lésion.

II. Etude 3 : l'HLH comme modèle pathologique du traitement visuel : effet d'une lésion occipitale gauche ou droite sur la reconnaissance de scènes naturelles en champ gauche, droit et central

1. Objectifs

La mise en évidence d'une spécialisation hémisphérique fonctionnelle au niveau du cortex occipital pour le traitement des scènes naturelles nous amène à nous interroger sur la nature des difficultés engendrées par une lésion occipitale gauche ou droite. L'objectif de cette recherche est d'observer les performances obtenues par des patients présentant une hémianopsie latérale homonyme droite ou gauche (cérébro-lésés gauche ou droit), et ainsi d'étudier le rôle de chaque cortex visuel primaire dans la perception de scènes naturelles, et plus précisément d'identifier les répercussions d'une lésion en fonction de sa latéralisation sur le traitement des basses et hautes fréquences spatiales contenues dans une scène visuelle.

En utilisant une tâche de reconnaissance de scènes naturelles, nous tentons dans notre étude, de mettre en évidence des capacités de *blindsight* dans le champ aveugle de patients atteints d'hémianopsie latérale homonyme. Nous souhaitons également explorer si ces capacités visuelles résiduelles sont préférentiellement véhiculées par les scènes en basses fréquences spatiales, auquel cas nous pourrions émettre l'hypothèse d'une voie sous-corticale résiduelle, qui permettrait ce traitement implicite.

Les résultats présentés sont ceux d'une étude comportementale chez les patients HLH dans les champs latéralisés et le champ central [avec des scènes naturelles filtrées en HFS, BFS et NF] pour une tâche de détection et de catégorisation. Afin d'évaluer la qualité de la perception visuelle chez les patient HLH, nous utilisons des images de scènes naturelles filtrées en fréquences spatiales, présentées dans le champ ispilectionnel et contralesionnel ainsi que le champ central. A l'aide d'une tâche de détection nous allons évaluer les capacités visuelles de bas niveau cognitif et à l'aide d'une tâche plus complexe : de catégorisation, nous pourrions évaluer un processus de plus haut niveau. Nous pourrions

également évaluer les capacités visuelles résiduelles dans le champ aveugle controlésionnel. Nous nous attendons à ce que les patients présentant des capacités de *blindsight* soient plus performants lors de la tâche de catégorisation qui constitue notre de tâche de choix forcé. Nous nous attendons également à un effet de la latéralisation de la lésion : un déficit spécifique dans le traitement des HFS chez les patients HLHd (cérébro-lésés gauche), et spécifique aux BFS chez les patients HLHg (cérébro-lésés droit) selon l'hypothèse d'asymétrie hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales.

2. Hypothèses générales

La mise en évidence d'une spécialisation hémisphérique fonctionnelle au niveau du cortex occipital pour le traitement des scènes naturelles nous amène à nous interroger sur la nature des difficultés engendrées par une lésion occipitale gauche ou droite. L'objectif de cette recherche est d'observer les performances obtenues par des patients présentant une hémianopsie latérale homonyme droite et gauche, et ainsi d'étudier le rôle de chaque cortex visuel primaire dans la perception de scènes naturelles, et plus précisément d'identifier les répercussions d'une lésion en fonction de sa latéralisation sur le traitement des basses et hautes fréquences spatiales contenues dans une scène visuelle.

On se demande si, le traitement des fréquences spatiales qui bénéficie d'une spécialisation hémisphérique au niveau du cortex visuel primaire (chez les sujets sains) persiste chez des patients hémianopsiques (avec une lésion unilatérale du cortex visuel) ?

Est-ce que ces patients gardent une spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales dans le CV sain malgré leur lésion ?

Est-ce que la latéralisation de leur lésion (droite ou gauche) affecte plus particulièrement un des traitements des fréquences spatiales (hautes fréquences spatiales à la suite d'une lésion gauche et basses fréquences spatiales à la suite d'une lésion droite) ?

Est-ce que l'occurrence du phénomène de *blindsight* dépend des fréquences spatiales (basses ou hautes) contenues dans la scène visuelle ? Ou de la tâche réalisée par le sujet, induite par la consigne verbale ? Dans ce cas, est-ce que les performances de catégorisation de scènes peuvent être meilleures que les performances de détection révélant ainsi un phénomène de *blindsight* ?

3. Méthode expérimentale

3.1. Participants

Au total, quarante sept sujets âgés de 22 à 77 ans (âge moyen : 48.3 ± 17.6 ans) ont participé à cette étude. Les performances obtenues par tous les contrôles (hommes et femmes) sont présentées Etude 1 [Article 1]. Le groupe d'hommes contrôles a été apparié aux patients HLH, en fonction de leur âge et de leur préférence manuelle. Ce groupe comprend 16 hommes dont 9 jeunes (âgés de 22 à 43 ans ; $m=31,8$ ans) et 7 âgés (âgés de 55 à 72 ans ; $m=62,6$ ans).

Le groupe de patients se compose de quinze patients cérébro-lésés présentant une hémianopsie latérale homonyme (objectivée par des champs visuels automatisés, présentés ci-après) sélectionnés à la suite de l'analyse de leur dossier médical afin que ces patients ne présentent pas de troubles associés pouvant biaiser leurs performances dans les tâches que nous leur avons proposées. Les patients participant à cette étude sont tous conscients de leur trouble, et ne présentent pas de négligence spatiale unilatérale, d'agnosie visuelle ni de troubles visuels périphériques. Ce groupe de patients hémianopsiques comprend 15 hommes droitiers dont 8 HLHg, 7 HLHd (Figure 49).

Table 1 : Données cliniques des trois groupes de participants : patients Hémianopsique gauche, avec une lésion Hémisphérique droite (HLHg, LHd), patients Hémianopsique droit avec une lésion hémisphérique gauche (HLHd, LHg).

		<i>HLHd-LHg</i> <i>group (n=7)</i>	<i>HLHg-LHd</i> <i>group (n=8)</i>
Niveau socio-culturel (ans) \pm SD †		9.00 \pm 4.77	9.29 \pm 5.28
Etiologie Lesion	Ischemique	4	4
	Hémorragique	2	2
	autre	1 TC	2 TC
Site lésionnel	O	4	7
	O-P	1	-
Epargne	complète	-	-
Maculaire	partielle	2	3
	absence	5	5
Délai depuis la lésion (mois) \pm SD		17.31 \pm 11.44	42.89 \pm 54.22

SD : Déviation Standard ; TC : Traumatisme crânien ; O : Occipital ; P : Pariétal ; †: Non-significatif (ANOVA; $p > .05$).

Pour trois patients le site lésionnel n'est pas précisé du fait de la mauvaise qualité des images IRM, nous permettant pas d'établir une localisation claire.

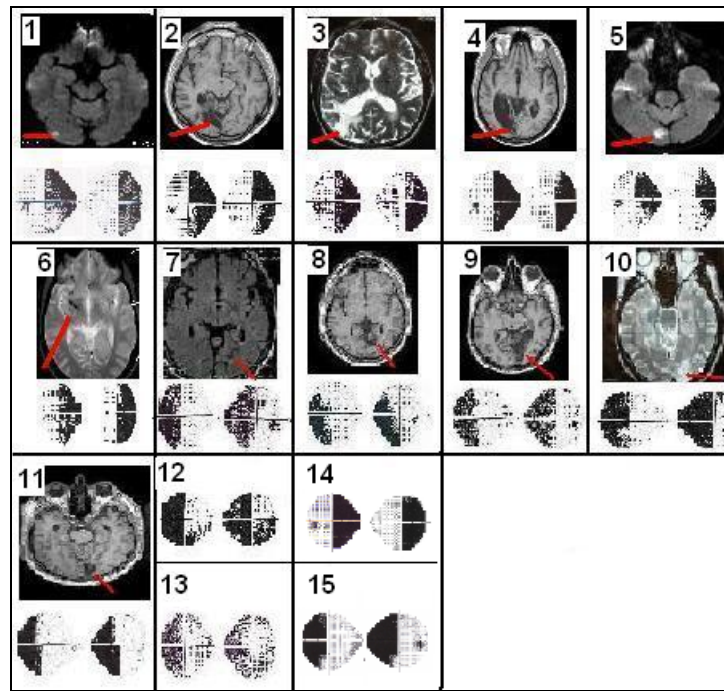


Figure 49 : Dans chaque case figure, pour chaque patient, l'IRM anatomique, mettant en évidence la lésion sur une coupe axiale et le champ visuel de chaque œil. Pour 4 patients figure uniquement les champs visuels.

3.2. Matériel et procédure

Exactement identique à celui mené chez les adultes sains, dont les résultats sont présentés lors de l'étude 1.

3.2.1. Stimuli

Les stimuli utilisés dans cette expérience sont des photographies en noir et blanc, carrées (en 256 niveaux de gris, leur taille réelle est de 256 par 256 pixels). Cette taille angulaire permet, en vision centrale, une présentation simultanée aux deux hémisphères cérébraux. Les stimuli représentent deux scènes naturelles appartenant à une catégorie sémantique différente : ville et forêt. Elles ont une orientation dominante similaire (verticale) ainsi leur identification ne peut pas se faire sur la base de ces informations (Guyader, Chauvin, Peyrin, Hérault et Marendaz, 2004). Les stimuli sont délivrés à l'aide du logiciel E-Prime, sur un écran d'ordinateur de 17 pouces, avec une résolution de 1024 par 768 pixels, et un taux de rafraîchissement de 85Hz. L'écran est placé à 110 cm du sujet, ainsi la taille angulaire des images correspond à 4° d'angle visuel. Pour chaque scène naturelle deux types d'images ont été créées, soit filtrées passe-bas (BFS) soit filtrées passe-haut (HFS).

La fréquence de coupure des scènes en BFS est inférieure à 4 cycles par degrés d'angle visuel (= 16 cycles par image pour une image de 4°) pour les BFS, et celle des scènes en HFS est supérieure à 6 cycles par degrés (= 24 cycles par image pour une image de 4°).

L'énergie totale des images HFS et BFS a été égalisée pour chaque scène, dans le but de créer des stimuli qui n'ont pas d'effet sur la spécialisation hémisphérique. De plus, la luminance moyenne de chaque stimulus est similaire.

La présentation des scènes peut se faire soit au centre de l'écran, soit dans le champ visuel droit (CVD), soit dans le champ visuel gauche (CVG). Lorsque la présentation est latéralisée (CVD et CVG) les bords internes ou externes du stimulus se situent respectivement à 1,5° et à 5,5° d'angle visuel d'excentricité rétinienne.

Nous avons utilisé 10 photographies de forêts et de villes différentes, et pour les essais dans lesquels rien n'apparaît nous avons laissé la plage neutre de l'arrière-plan de l'écran.

3.2.2. Procédure (identique à celle de l'étude 1)

Les participants ont été testés à la Fondation Ophtalmologique de Rothschild. Ils ont été évalués individuellement, dans une pièce sombre et calme, leur tête est centrée sur l'écran et reste immobile (pas de mentonnière). L'ensemble du protocole a été réalisé en une seule fois pour les participants contrôles (environ 1 heure pour chaque sujet) et en 2 fois pour certains patients présentant une grande fatigabilité (environ 1 heure et 30 minutes pour chacun d'entre eux) ; l'ordre de passation des épreuves était le même pour tous les sujets. Les participants manipulent la SRbox avec leur main dominante (*Cf.* consigne en annexe 2). Les réponses des participants sont enregistrées automatiquement par le programme qui délivre les stimuli. Les variables dépendantes étudiées sont le temps de réaction pour les réponses correctes, et le taux d'erreurs commis par chacun des participants.

3.2.3. Tâches

a. Tâche de détection

La phase d'expérimentation est précédée d'une période d'essai de 18 présentations, dont 5 scènes non-filtrées, 8 filtrées et 5 sans stimulus.

Pour chaque essai l'apparition du stimulus est précédée d'un point de fixation (dans le but de garder la direction du regard au centre de l'écran) durant 800 ms, suivi d'un son avertissant l'arrivée d'un stimulus. Le stimulus est présenté à l'écran durant 100ms.

Deux essais sont séparés par un intervalle de 2 secondes, après la réponse du sujet. Le sujet dispose de 2 secondes pour donner sa réponse, au-delà, la réponse n'est pas enregistrée.

Les stimuli (lorsque l'image apparaît à l'écran) apparaissent soit dans le CVD, CVG ou CV central. Pour chaque essai, les participants ont pour but de juger si le stimulus (ville ou forêt) est présent quel que soit le contenu en fréquences spatiales. Chaque participant a pour instruction de répondre le plus rapidement possible, avec sa main droite posée sur le boîtier réponse E-prime (placé sur le plan sagittal, de façon à contrôler l'effet de la localisation de l'image à l'écran et de la main de réponse, sur l'asymétrie hémisphérique). Il doit appuyer sur le bouton du haut avec le majeur lorsqu'il juge que rien n'est apparu et avec l'index sur le bouton du bas lorsqu'il juge qu'un stimulus est apparu à l'écran. Le temps et la précision des réponses (correcte ou incorrecte) de chaque sujet sont enregistrés.

Cette tâche de détection est constituée de 4 phases de 6 minutes environ, chaque phase contient 60 présentations soit un total de 240 présentations pour l'ensemble de la tâche (15 présentations à gauche du point de fixation / 15 présentations à droite du point de fixation / 15 présentations centrées / 15 présentations dans lesquelles rien n'apparaît). Les stimuli apparaissent dans un ordre pseudo-aléatoire (contrôlé au niveau du nombre de réponse : il n'y a jamais plus de 4 présentations identiques à la suite).

b. Tâche de catégorisation

La phase d'expérimentation est précédée d'une période d'essai comprenant 16 présentations (dont 7 images non filtrées et 9 filtrées).

Pour chaque essai l'apparition du stimulus est précédée d'un point de fixation central durant 800 ms, suivi d'un bip sonore permettant d'avertir le sujet de l'apparition de l'image, simultanément à ce bip l'image apparaît durant 100ms, suivie d'une plage grise de réponse disparaissant avec la réponse du sujet ou au bout de 2 secondes (au-delà de ce temps la réponse du sujet n'est pas enregistrée).

Cette tâche est composée de 3 phases de 60 présentations, chaque phase est séparée par un intervalle de 2 minutes environ selon les besoins du sujet.

Chaque phase dure approximativement 5 minutes. Une phase comprend 20 présentations à gauche du point de fixation, 20 présentations à droite du point de fixation et 20 présentations centrales.

Nous avons donc un total de 180 images : 90 villes et 90 forêts, dont 30 filtrées passe-haut, 30 filtrées passe-bas et 30 neutres. Il y a 60 images différentes (2 catégories * 10 images * 3 résolutions) pouvant apparaître chacune à 3 positions différentes (centre, gauche, droite).

Pour chaque essai, les participants ont pour but de juger si le stimulus est une ville ou une forêt quel que soit le contenu en fréquences spatiales.

Chaque participant a pour instruction de répondre le plus rapidement possible, avec sa main droite posée sur le boîtier réponse E-prime (placé sur le plan sagittal, de façon à contrôler l'effet de la localisation de l'image à l'écran et de la main de réponse, sur l'asymétrie hémisphérique). Il doit appuyer sur le bouton du haut avec le majeur lorsqu'il juge que l'image représente une forêt et avec l'index sur le bouton du bas lorsqu'il juge que le stimulus apparu à l'écran est une ville.

Les stimuli apparaissent dans un ordre pseudo-aléatoire (contrôlé au niveau du nombre de réponse : il n'y a jamais plus de 4 présentations identiques à la suite).

3.4. Plan d'expérience

$$\underline{S}_n < G_3 * X_2 * A_2 > * TS_2 * FS_3 * CV_3$$

-S (sujets) : N=47

- G₃, (groupes) : g₁= patients avec HLH gauche complète (sans négligence ni autres troubles) (N=8) ; g₂= patients avec HLH droite complète (sans négligence ni autres troubles) (N=7) ; g₃= contrôles (N=31)

- X₂, (sexe) : x₁=homme/x₂=femme

- A₂, (âge) : a₁=jeunes (<43 ans), a₂=âgés (>55 ans)

- TS₂, (type de scène) : ts₁=ville, ts₂=forêt

- FS₃, (fréquence spatiale) : fs₁=non filtrée, fs₂=basse FS, fs₃=haute FS

- CV₃, (champ visuel) : cv₁=centre, cv₂=gauche, cv₃=droit

3.5. Hypothèses opérationnelles

3.5.1. Tâche de détection

1) a) Est-ce que l'effet de la présence (ou absence) de la cible a une incidence sur la détection chez les patients hémianopsiques ? Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant : $\underline{S_n} < G_2 > * C_2$

1) b) Est-ce que les patients hémianopsiques parviennent à détecter des stimuli dans leur CV aveugle, et ceci au dessus du hasard ? Est-ce que les BFS sont mieux détectées dans le CV amputé ? Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant : $\underline{S_n} < G_2 > * TS_2 * FS_3 * CV_3$, chez 8 patients HLHg et 7 patients HLHd, selon le CV de présentation des stimuli : central, sain et aveugle.

Si le *blindsight* emprunte une voie sous-corticale qui contourne V1, on s'attend à ce que les BFS soient mieux détectées dans le CV aveugle des patients HLH quelque soit le côté de leur lésion.

3.5.2. Tâche de catégorisation

1) Est-ce que le traitement des fréquences spatiales qui bénéficie d'une spécialisation hémisphérique (HFS traitées par HG et BFS traitées par HD) au niveau du cortex visuel primaire (chez les sujets sains) persiste chez des patients hémianopsiques (avec une lésion du cortex visuel) ?

Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant : $\underline{S_n} < G_2 > * TS_2 * FS_3 * CV_3$, en comparant tout d'abord les performances obtenues par le groupe contrôle (composé de 16 hommes) à celles obtenues par le groupe HLHg (composé de 8 patients), puis les performances obtenues par le groupe contrôle à celles obtenues par le groupe HLHd (composé de 7 patients). On sépare les deux analyses, car suivant la latéralisation de la lésion des patients nous n'avons pas les mêmes hypothèses, mais également parce que nous prenons en compte le champ sain ou aveugle des patients, tantôt à gauche tantôt à droite.

On s'attend à ce que les sujets HLHg (cérébro-lésés droit) aient des difficultés dans le traitement global des scènes filtrées passe-bas, et ce même en condition de présentation centrale et dans CV voyant. En revanche on s'attend à ce que les patients HLHd (cérébro-lésés gauche) présentent plus de difficultés dans le traitement des caractéristiques locales,

des scènes filtrées passe-haut (car l'hémisphère droit est plus spécialisé pour le traitement global, et l'hémisphère gauche plus spécialisé dans le traitement local) ?

2) Est-ce que les patients HLHg (cérébro-lésés droit) obtiennent des performances similaires de celles obtenues par les HLHd (cérébro-lésés gauche)? Est-ce que les BFS sont mieux traitées que les HFS dans leur CV aveugle ?

Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant $S_n < G_2 > * TS_2 * FS_3 * CV_3$, uniquement chez les patients (HLHg et HLHd), en fonction du CV de présentation des scènes (central-aveugle-voyant).

On s'attend à ce que le groupe de patients HLHg (cérébro-lésés droit), rencontre des difficultés dans le traitement à la fois des HFS et des BFS, on s'attend également à ce que le groupe de patients HLHd (cérébro-lésés gauche), présente plus de difficultés dans le traitement des HFS.

Toutefois, on s'attend à ce que le *blindsight* soit véhiculé par la voie magnocellulaire (qui est spécialisée dans le traitement de BFS) : on s'attend donc à observer plus de *blindsight* pour le traitement des BFS. De plus, on s'attend à voir un meilleur traitement des BFS dans le CV amputé des patients HLHd, car leur HD non lésé est plus spécialisé dans le traitement des BFS que dans le traitement des HFS.

3.5.3. Détection versus catégorisation

Est-ce que les performances de catégorisation sont plus élevées chez les patients hémianopsiques que les performances de détection ?

Cette analyse se fera selon le plan expérimental suivant : $S_n < G_2 > * T_2 * TS_2 * FS_3 * CV_3$, uniquement chez les patients (HLHg et HLHd), en fonction de la consigne (détection/catégorisation), du type de scène (ville/forêt), des fréquences spatiales des scènes (BFS/HFS/NF) et du CV de présentation des scènes (central-aveugle-voyant).

Si les patients présentent du *blindsight* on s'attend à ce qu'il soit facilité par les basses fréquences spatiales.

4. Résultats

Les temps de réaction (TR) inférieurs à 100 millisecondes (ms) ont été supprimés (considérés comme une non-réponse), puisque une réponse motrice ne peut pas être aussi rapide. Nous avons réalisé une analyse statistique sur les performances (taux d'erreurs et temps de réponse) obtenues par les patients HLHg et HLHd ainsi que par les hommes contrôles (les résultats concernant les participants contrôles sont présentés étude 1, Article 1).

4.1. Tâche de détection

Nous observons qualitativement un taux de fausses alarmes (lorsque les sujets détectent une cible alors qu'il n'y en a pas) de 3,5% chez les contrôles, de 5,8% chez les patients HLHg (cérébro-lésés droit) et de 10,7% chez les patients HLHd (cérébro-lésés gauche). Le taux d'omissions (lorsque la cible apparaît et que les sujets ne la détectent pas) est de 1,35% chez les contrôles, de 19,2% chez les patients HLHg et de 9,9% chez les patients HLHd.

- Analyse 1 : Est-ce que la présence ou l'absence de la cible a un effet sur les performances obtenues par les patients en tâche de détection ?

a) l'ANOVA réalisée sur le facteur groupe (HLHd/HLHg) en inter et sur le facteur cible (présence/absence) en intra ne révèle aucun effet du groupe sur les TR et sur le TE, cependant d'un point de vue qualitatif nous pouvons noter que les HLHg font plus d'erreurs (présence de la cible : $19.2 \pm 9.9\%$ / $5.8 \pm 10.7\%$ et absence de la cible : $5.8 \pm 5.8\%$ / $10.7 \pm 23.2\%$) et obtiennent des TR moins rapides que les HLHd ($524 \pm 191.6\text{ms}$ et $433.6 \pm 109.7\text{ms}$). Nous observons un effet significatif de la présence de la cible sur les temps de réponse ($F(1,13)=11,76$; $p<.0045$), ceux-ci sont allongés pour la détection d'absence de la cible par rapport à sa présence (respectivement : $520.9 \pm 150.4\text{ms}$ et $443.6 \pm 170.6\text{ms}$).

b) L'ANOVA réalisée sur le facteur groupe (HLHg/HLHd), en inter et sur les facteurs type de scènes (ville/forêt), fréquences spatiales (BFS/HFS/NF) et champ visuel de présentation (centre/sain/aveugle) en intra pour les cibles présentes, révèle : un effet du CV sur le TE ($F(2,26)=7,70$; $p<.0024$). Les cibles sont mieux détectées dans le CV central ($3.6 \pm 43.6\%$)

que dans le CV aveugle ($3.9 \pm 11.5\%$, $p=.0021$) et dans le CV sain ($3.6 \pm 43.6\%$) que dans le CV aveugle (4.2 ± 11.8 , $p=.0022$).

Nous observons un effet du groupe marginalement significatif sur les TR ($F(1,8)=4,43$; $p<.0685$), les patients HLHg ($467.8 \pm 192.3\text{ms}$) obtiennent des TR plus lents que les patients HLHd ($393 \pm 154.4\text{ms}$). Il existe une interaction significative entre les facteurs groupe*CV sur les TR ($F(2,16)=5,97$; $p<.01$) : dans le CV central et sain, les patients HLHd (respectivement : $337.7 \pm 89.6\text{ms}$ et $369 \pm 120\text{ms}$) obtiennent des TR nettement plus rapides que ceux obtenus par les patients HLHg (central vs sain : $464.1 \pm 212.9\text{ms}$, $p=.02$; et $513.5 \pm 188\text{ms}$, $p=.00008$), alors que dans le CV aveugle les TR ne diffèrent pas entre ces deux groupes (HLHg vs HLHd : $464.5 \pm 212.6\text{ms}$ et $410.1 \pm 152.9\text{ms}$, $p=.736$)(Cf. figure 50).

Les TR obtenus par les patients HLHd sont plus longs dans le CV aveugle par rapport au CV sain ($p=.0041$). En revanche les patients HLHg détectent aussi rapidement dans le CV aveugle que dans le CV central et sain (centre/aveugle $p=.501$, sain/aveugle $p=.143$).

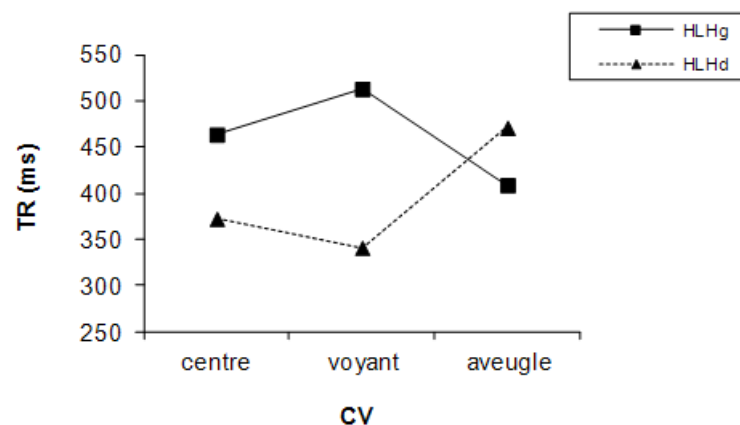


Figure 50 : Temps de réponse en millisecondes, obtenus par les patients hémianopsiques droit et gauche à la tâche de détection, en fonction du champ visuel de présentation de la cible.

4.2. Tâche de catégorisation

- Analyse 2 : est-ce que la spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales persiste chez les patients hémianopsiques gauche (HLHg/lésion droite)?

Le groupe de patients HLHg et le groupe contrôle, sont bien appariés en âge ($t(22)=1,35$; $p=.191$) (mHLHg : $55,1\pm 16,6$ ans ; mcontrôles : $45,3\pm 16,8$ ans).

L'ANOVA réalisée sur le facteur groupe (patients HLHg /contrôle) en inter, et sur les facteurs type de scène (ville/forêt), fréquences spatiales (BFS/HFS/NF) et CV de présentation (gauche/centre/droit) en intra, révèle un effet du groupe à la fois sur les TR et les TE. Les patients ($23\pm 28.5\%$) font plus d'erreurs que les contrôles ($6\pm 5.9\%$), ($F(1,22)=40.22$; $p=.000002$). Ils obtiennent aussi des TR plus lents (762.5 ± 275.4 ms) que les contrôles (491.9 ± 156.1 ms), ($F(1,19)=16,81$; $p=.0006$). On note un effet significatif des fréquences spatiales sur le TE ($F(1,22)=6,94$; $p=.0151$), les participants font plus d'erreurs pour traiter les HFS ($11.9\pm 21.1\%$) par rapport aux BFS ($8.6\pm 19.2\%$) et aux NF ($7.8\pm 18.3\%$). On retrouve un effet des fréquences spatiales sur les TR ($F(2,38)=12,63$; $p<.0001$), ceux-ci sont plus longs pour les HFS (645.4 ± 288.7 ms) que pour les BFS (564.3 ± 203.3 ms) et les NF (531.2 ± 201.6 ms). Il est important de signaler un effet non attendu du type de cible à la fois sur le TE ($F(2,44)=10,37$; $p=.000204$) et sur les TR ($F(1,19)=5,09$; $p=.036$). En effet, les participants font plus d'erreurs pour traiter les forêts ($12.1\pm 22.8\%$) que pour traiter les villes ($6.8\pm 15.44\%$). Les TR sont plus longs pour les forêts (603.1 ± 228.4 ms) que pour les villes (558.1 ± 248.1 ms). Il ressort de cette analyse une interaction significative des facteurs groupe*champ visuel*type de scène*fréquences spatiales sur le TE ($F(5,89) = p<.0003$) (Cf. figure 51, ci-après). Nous observons également une interaction significative entre les facteurs Groupe*champ visuel*fréquences spatiales sur les TR ($F(4,76)=8,076$; $p=.000018$). Du fait qu'il existe un effet principal du facteur type de scène nous décrivons cette interaction séparément pour les villes et les forêts : c'est-à-dire l'interaction entre les facteurs Groupe*champ visuel*fréquences spatiales*type de scène sur les TR, bien qu'elle ne soit pas significative ($F(4,76)=1,08$; $p=.368$).

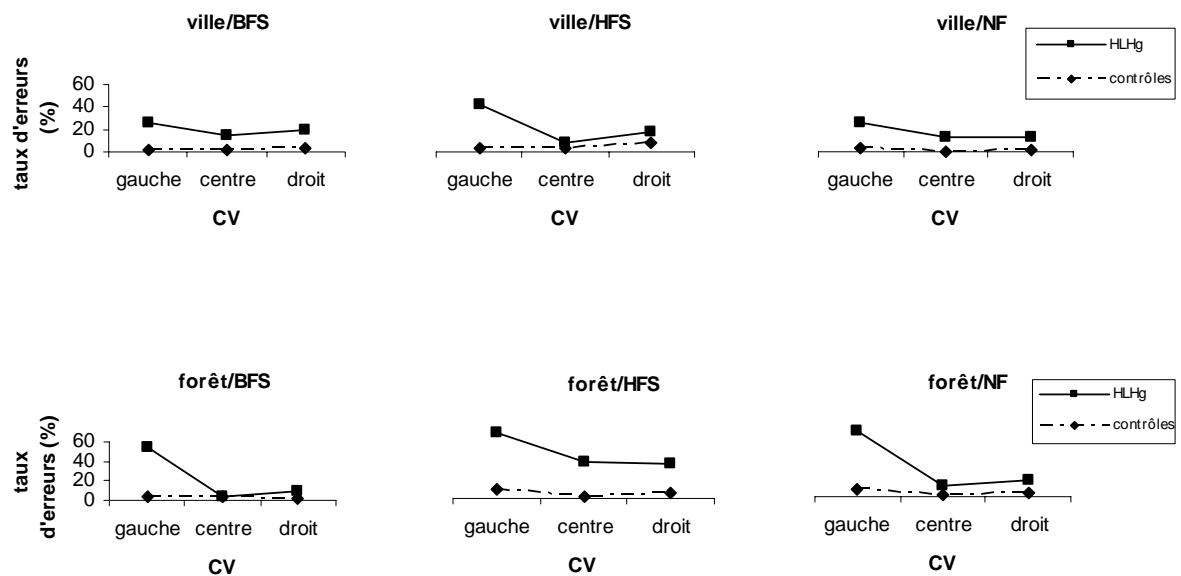


Figure 51 : Taux d'erreurs en pourcentages obtenus par les contrôles et les patients hémianopsiques gauche, à la tâche de catégorisation en fonction du champ visuel de présentation et des fréquences spatiales des scènes, pour les villes et les forêts.

Les comparaisons post-hoc mettent en évidence, d'une part, que dans le CV droit (=sain pour les patients HLHg) les patients HLHg font plus d'erreurs (TE, villes : $p=.00002$ et forêts : $p=.022$), et obtiennent des TR plus longs (TR, villes : $p=.00000$, forêts : $p=.00001$) que les contrôles pour traiter les BFS. Les patients font également plus d'erreurs que les contrôles (TE : villes $p=.0227$, et forêts : $p=.00000$) et obtiennent des TR plus longs pour traiter les HFS (TR : villes : $p=.00000$, et forêts : $p=.00000$). Ils font également plus d'erreurs pour traiter les scènes NF (villes : $10\pm15.1\%$ et $0.6\pm2.5\%$, forêts : $13.7\pm14\%$ et $2.5\pm4.4\%$) et obtiennent des TR plus longs (villes : $657.1\pm215\text{ms}$ et forêts : $629.6\pm162.7\text{ms}$) que les contrôles (villes : $447.6\pm130\text{ms}$, et forêts : $472\pm118.8\text{ms}$), et ce quelque soit le CV de présentation. D'autre part, dans le CV central, les analyses révèlent : tout d'abord pour le taux d'erreurs (TE) nous remarquons que pour *les villes* les patients HLHg ($15\pm23.3\%$) font plus d'erreurs que les contrôles ($1.8\pm4\%$) pour traiter les BFS et les NF (mHLHg= $6.2\pm10.6\%$ et mcontrôles= $1.8\pm4\%$). En revanche ils traitent aussi bien les HFS que les contrôles. Pour *les forêts* les patients ($31.2\pm27.4\%$) font plus d'erreurs que les contrôles ($1.8\pm7.5\%$) pour traiter les HFS alors qu'ils traitent aussi bien les BFS que les contrôles (mHLHg= $2.5\pm4.6\%$ et mcontrôles= $2.5\pm5.7\%$).

Par ailleurs, les patients obtiennent des TR plus longs que les contrôles quelque soit la résolution des scènes (Cf. Table 2, ci-après, dans laquelle figure les moyennes correspondantes).

Table 2 : Présentant les moyennes (*ET*) en millisecondes des performances obtenues par les contrôles et les patients HLHg à la tâche de catégorisation.

HLHg			Contrôles		
BFS	HFS	NF	BFS	HFS	NF
682.6	807.9	645.6	484.4	500.8	443.4
(139.6)	(254.7)	(809.1)	(131.3)	(178.5)	(128.5)

- Analyse 3 : est-ce que la spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales persiste chez les patients hémianopsiques droit (HLHd/lésion gauche)?

Le groupe de patients HLHd et le groupe contrôle, sont bien appariés en âge. En effet, la différence d'âge entre ces deux groupes n'est pas significative ($t(21)=1,23$; $p=.232$) (mHLHd : $54,4 \pm 15,1$ ans et mcontrôles : $45,3 \pm 16,8$ ans).

L'ANOVA réalisée sur le facteur groupe (patients HLHd/contrôles) en inter, et sur les facteurs type de scène (ville/ forêt), fréquences spatiales (BFS/HFS/NF) et CV de présentation (gauche/centre/ droit) en intra, révèle un effet du groupe à la fois sur le TE ($F(1,21)=10,74$; $p=.0035$) et sur les TR ($F(1,21)=5,28$; $p=.0318$). Les patients HLHd ($10.7 \pm 18.3\%$) font plus d'erreurs que les contrôles ($2.6 \pm 5.9\%$). Les patients (642.5 ± 214.5 ms) obtiennent également des TR plus ralentis que les contrôles (491.9 ± 156.1 ms). On observe un effet significatif des fréquences spatiales sur le TE ($F(2,42)=7,79$; $p=.0013$), celui-ci est plus important pour les HFS par rapport aux BFS et aux NF (HF : $7.4 \pm 14.4\%$, BF : $4.4 \pm 10\%$, NF : $3.4 \pm 10.2\%$) et sur les TR ($F(2,42)=22,44$; $p<.0000$) qui sont plus lents pour traiter les HFS (593.3 ± 223.5 ms par rapport aux BFS : 527 ± 169.1 ms et aux NF : 492.4 ± 153.9 ms).

Nous présentons l'interaction groupe*champ visuel*fréquences spatiales sur le TE (villes et forêts regroupées), bien qu'elle ne soit pas significative ($F(4,84)=1,29$; $p<.2807$). Cependant, les comparaisons planifiées (post-hoc LSD) permettent de constater que dans le CV gauche (sain pour les hémianopsiques droit) : il n'y a pas de différence significative entre les patients ($3.5\pm6.3\%$) et les contrôles ($2.5\pm6.2\%$, $p=.5781$), pour traiter les BFS et les NF ($mHLHd=2.1\pm4.2\%$ et $mcontrôles=2.9\pm6.3\%$, $p=.727$). En revanche les patients HLHd ($14.3\pm22.1\%$) font significativement plus d'erreurs que les contrôles ($3.9\pm8\%$, $p=.000002$) pour traiter les HFS (Cf. figure 52).

Il ressort de cette analyse une interaction significative entre les facteurs groupe*champ visuel*type de scènes*fréquences spatiales sur les TR ($F(4,84)=2,76$; $p=.033$). Nous représentons l'interaction groupe*CV*FS séparément pour les villes et les forêts (Cf. figure 53), du fait de la présence d'un effet non-attendu du type de scènes ($F(1,21)=21,08$; $p=.000158$), en effet les TR obtenus pour les forêts ($567.4\pm194.3ms$) sont plus longs que pour les villes ($508.2\pm178.9ms$). Dans le CV gauche (sain pour les patients HLHd) : les patients HLHd (ville : $673.8\pm222ms$ et forêt : $825.1\pm 324.5ms$) obtiennent des TR plus longs que les contrôles (ville : 527.3 ± 176.5 , $p=.000001$, forêt : 619.7 ± 220.1 , $p=.000000$), pour traiter les HFS c'est également le cas pour les BFS (ville : $mHLHd = 546.4\pm207.9$ et $mcontrôles = 434.6\pm112$, $p=.000127$, forêt : $mHLHd = 637.4\pm188.1$ et $mcontrôles= 512.1\pm134.1$, $p=.000021$). Les patients HLHd, obtiennent des TR plus courts pour traiter les BFS ($591.0\pm196.2ms$) que les HFS ($749.4\pm278ms$) dans le CV gauche (ville : $p=.000205$, forêt : $p=.00000$).

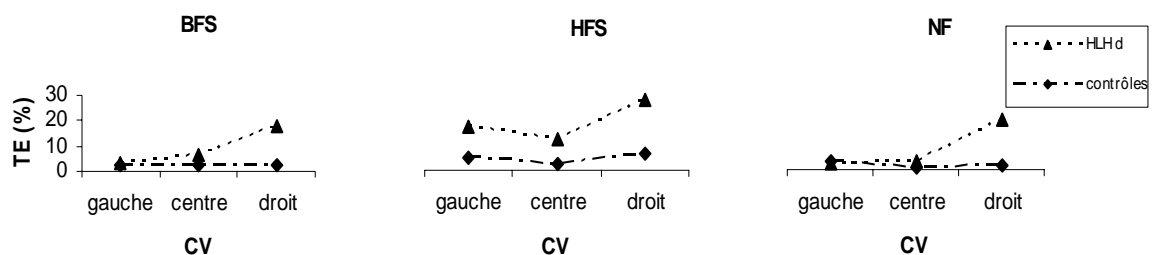


Figure 52 : Taux d'erreurs en pourcentages obtenus par les contrôles et les patients hémianopsiques droit, à la tâche de catégorisation en fonction du champ visuel de présentation et des fréquences spatiales des scènes.

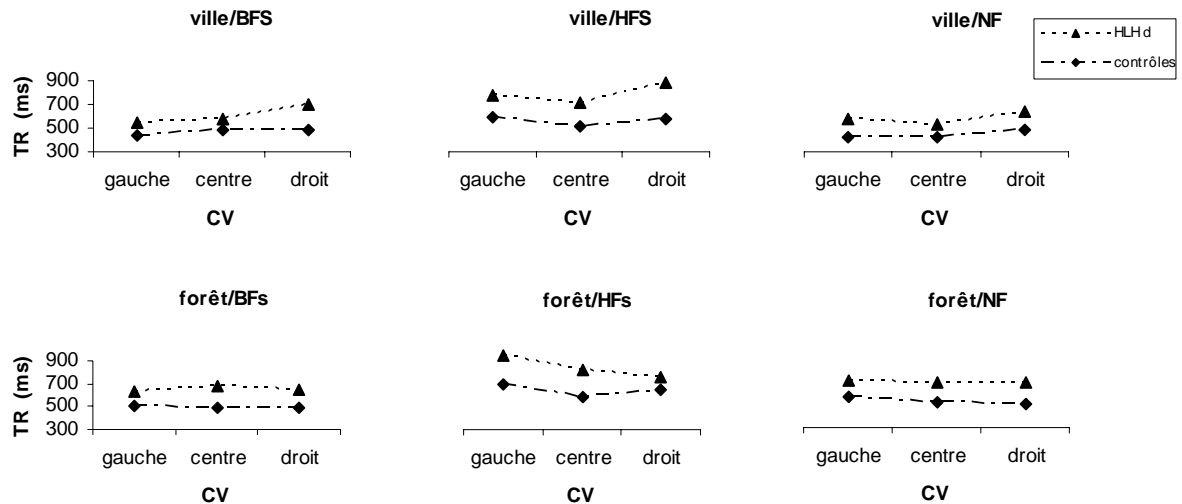


Figure 53 : Temps de réponse en millisecondes, obtenus par les contrôles et les patients hémianopsiques droit, à la tâche de catégorisation en fonction du champ visuel de présentation et des fréquences spatiales des scènes.

- Analyse 4 : Est-ce que les patients hémianopsiques droit (HLHd/lésion gauche) obtiennent des performances similaires aux patients hémianopsiques gauche (HLHg/lésion droite) ?

Un test t a été effectué sur les âges de ces deux groupes de patients hémianopsiques, il met en évidence qu'ils sont bien appariés en âge ($mHLHg=55.1\pm16.6$; $mHLHd=54.4\pm15.1$; $t(13) = .08$; $p=.934$). L'ANOVA réalisée sur le facteur groupe (HLHg /HLHd) en inter, et sur les facteurs type de scène (ville/forêt), fréquences spatiales (BFS/HFS/NF) et CV de présentation (gauche/centre/droit) en intra, révèle une tendance à la significativité pour l'effet du groupe sur le TE ($F(1,13)=4.47$, $p=.05$), le groupe HLHg ($23.1\pm28.6\%$) commet plus d'erreurs que le groupe de HLHd ($10.7\pm18.3\%$). On remarque un effet du champ visuel de présentation sur le TE ($F(1,26)=12.74$; $p=.000139$), les patients font moins d'erreurs pour catégoriser dans leur CV sain ($11.6\pm17.9\%$) que dans leur CV aveugle, ($30.8\pm32.2\%$, $p=.0001$), ils font également moins d'erreurs dans le champ central ($9.6\pm15.9\%$) que dans leur CV aveugle ($30.8\pm32.2\%$, $p=.0003$). On observe un effet significatif des fréquences spatiales sur le TE ($F(1,26)=6.74$; $p=.004370$), les patients font plus d'erreurs pour traiter les HFS ($22.3\pm26.6\%$) par rapport aux BFS ($15.6\pm24.1\%$, $p=.0018$) et par rapport aux NF ($14\pm23.9\%$, $p=.009$). Les patients (HLHd et HLHg) tendent à faire moins d'erreurs pour traiter les BFS ($29.7\pm32.1\%$) que les HFS dans le CV aveugle ($34.3\pm30.9\%$, $p=.08$).

Il est intéressant de préciser qu'il n'y a pas d'effet significatif du facteur CV de présentation sur les TR ($F(2,20)=1,647$; $p=.217$), les patients sont aussi rapides pour traiter les scènes dans leur CV sain et aveugle (respectivement : $693.2\pm254.1\text{ms}$ et $756.3\pm289.8\text{ms}$). On note un effet significatif du facteur fréquences spatiales sur les TR ($F(2,20)=11,759$; $p=.0004$), ceux-ci sont moins rapides chez les patients pour traiter les HFS ($790.3\pm299.2\text{ms}$) que les BFS ($686.3\pm224.6\text{ms}$, $p=.0032$), et que les NF ($639.8\pm211\text{ms}$, $p=.0001$). Soulignons également l'interaction entre les facteurs champ visuel de présentation et fréquences spatiales sur les TR qui tend à être significative ($F(4,40)=2.30$; $p<.0751$). On constate que dans le CV central les NF ($606.1\pm203.5\text{ms}$) sont plus vite traitées que les BFS ($659.5\pm167.3\text{ms}$, $p=.01$), les BFS ($659.5\pm167.3\text{ms}$) qui sont elles mêmes plus vite traitées que les HFS ($743.9\pm242.6\text{ms}$, $p=.005$). Dans le CV sain, le profil est quasiment identique, les BFS ($648\pm208.5\text{ms}$) sont plus vite traitées que les HFS ($819\pm309.9\text{ms}$, $p=.00002$), de plus les BFS ($648\pm208.5\text{ms}$) sont aussi rapidement traitées que les NF (612.7 ± 182.9 , $p=.167$). Dans le CV aveugle les TR obtenus pour les BFS ($753.8\pm278.3\text{ms}$) sont nettement plus courts que pour les HFS (808.6 ± 342.7 , $p=.0275$), les NF ($704.8\pm700.2\text{ms}$) sont plus vite traitées que les HFS ($808.6\pm342.7\text{ms}$, $p=.014$) ce qui est concordant avec les TE. Il existe une interaction entre les facteurs groupe*champ visuel de présentation*fréquences spatiales sur les TR (Cf. figure 54), qui est marginalement significative $F(4,40)=2,24$; $p=.0814$), qualitativement (puisque'il n'y a pas d'effet significatif du groupe) les hémianopsiques droit sont plus rapides que les hémianopsiques gauche. Les hémianopsiques droit ne traitent pas moins vite les HFS par rapport aux hémianopsiques gauche (contrairement à ce qu'on attendait), et ceci quelque soit le CV (centre : $p=.0004$, sain : $p=.59$, aveugle : $p=.005$). Les hémianopsiques droit traitent plus rapidement les BFS que les HFS, dans le CV sain ($p=.00007$).

Il est important de préciser que les TR obtenus pour les BFS sont plus rapides dans le CV aveugle que voyant ($p=.025$). Les patients hémianopsiques gauche, traitent moins rapidement les BFS des HFS par rapport aux hémianopsiques droit quel que soit le CV de présentation (nous notons que les HLHg obtiennent des TR plus longs que les HLHd dans toutes les conditions). Les hémianopsiques gauche traitent aussi rapidement les BFS dans leur CV sain, aveugle et central. Dans le CV voyant et aveugle, ils obtiennent des TR plus rapides pour les BFS que pour les HFS ($p=.01$; $p=.06$).

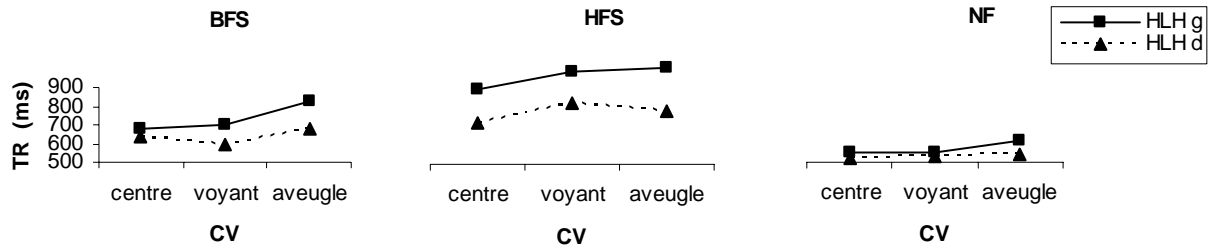


Figure 54 : Temps de réponse en millisecondes obtenus par les patients HLHg et HLHd, à la tâche de catégorisation en fonction du champ visuel de présentation et des fréquences spatiales des scènes.

4.3. Tâche de catégorisation versus tâche de détection

Analyse 5 : est-ce que les patients hémianopsiques catégorisent mieux les scènes qu'ils ne les détectent, dans leur CV aveugle ? Une ANOVA a été réalisée sur le facteur groupe en inter (hémianopsiques droit / hémianopsiques gauche) et sur les facteurs type de tâche (détection/catégorisation), CV de présentation (centre/voyant/sain), type de scène (villes/forêts), et fréquences spatiales (BFS/HFS/NF) en intra. Cette analyse révèle : une tendance à la significativité de l'effet du groupe sur le TE ($F(1.13)=3.5$; $p=.082$), (Cf. figure 55) les patients HLHd ($10.3\pm 23\%$) obtiennent de meilleures performances que les patients HLHg ($21.1\pm 31.1\%$). On remarque un effet du CV sur le TE ($F(2.26)=11.6$; $p=.0002$) les patients hémianopsiques font plus d'erreurs dans le CV aveugle ($33.6\pm 38.4\%$) par rapport au CV sain (et $7.9\pm 15.6\%$, $p=.0003$) et par rapport au CV central ($6.7\pm 14.1\%$, $p=.0002$). Notons également un effet des Fréquences spatiales sur le TE ($F(2.26)=5.45$; $p=.01$). En effet, les patients font plus d'erreurs pour traiter les HFS ($19.9\pm 29.8\%$) que pour les BFS ($14.4\pm 27.2\%$, $p=.01$) et les NF ($13.9\pm 27\%$, $p=.006$). Cette analyse fait ressortir une interaction significative entre les facteurs groupe*tâche*champ visuel de présentation*Type de Scène sur le TE ($F(2.26)=5.52$; $p<.0101$).

Les comparaisons post-hoc révèlent concernant les villes, que les performances obtenues par les patients HLHd ne diffèrent pas dans leur CV aveugle lors de la détection ($30.5\pm 39.9\%$) par rapport à la catégorisation ($26.7\pm 39.9\%$, $p=.473$). Tandis que les patients HLHg obtiennent de meilleures performances pour catégoriser les villes ($26.7\pm 29\%$) dans leur CV aveugle, que pour les détecter ($42.5\pm 43.7\%$, $p=.003$). Concernant les forêts, les patients HLHd obtiennent de meilleurs performances dans le CV aveugle, pour la catégorisation ($11.4\pm 14.2\%$) que pour la détection ($27.1\pm 42.1\%$, $p=.0058$). Ils ne font pas

plus d'erreurs lors de la tâche de catégorisation, dans le CV aveugle ($10.9 \pm 24.1\%$) que dans le CV central ($6.4 \pm 11.6\%$, $p=.473$) et sain ($6.7 \pm 14.3\%$, $p=.786$), tandis que pour la détection ils font significativement plus d'erreurs dans le CV aveugle ($28.8 \pm 40.6\%$), par rapport au CV sain ($0.2 \pm 1.5\%$, $p=.00002$) et central ($0.7 \pm 3.4\%$, $p=.00004$). En d'autres termes, les courbes de détection mettent en évidence que les patients font plus d'erreurs dans le CV aveugle que dans le champ sain et central. Pour la catégorisation les courbes obtenues soulignent qu'ils font significativement moins d'erreurs et ce particulièrement pour les forêts chez les patients HLHd et on note le même profil, de manière qualitative (mais non significative), pour les villes chez les patients HLHg.

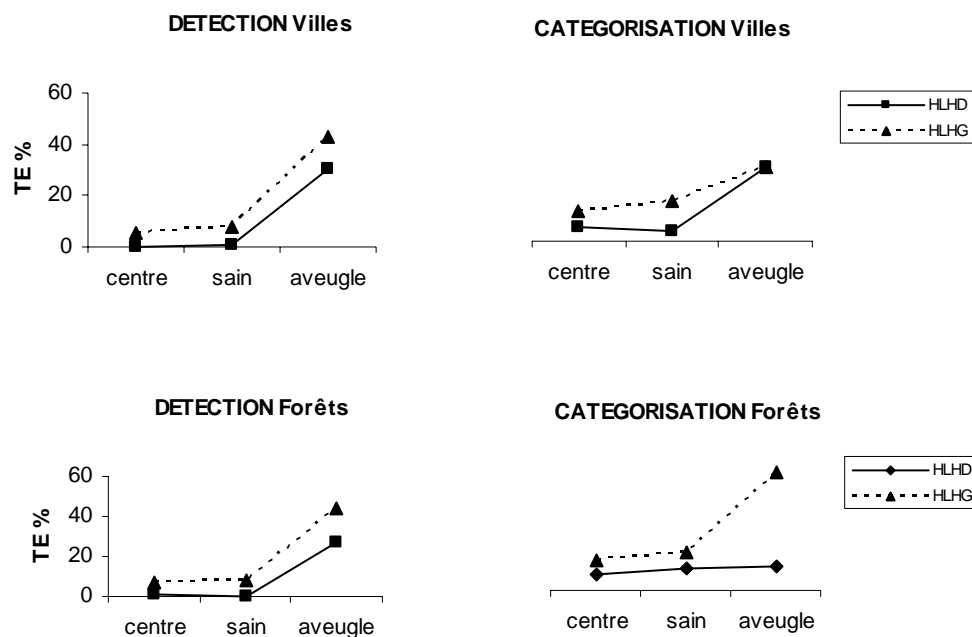


Figure 55 : Taux d'erreurs en pourcentages, obtenus par les patients hémianopsiques droit et gauche, en fonction du type de tâche (détection versus catégorisation), du champ visuel de présentation, du type de scène (ville/forêt) et des fréquences spatiales (BFS/HFS/NF) des scènes.

4.4. Résumé résultats

Les temps de réaction (TR) inférieurs à 100 millisecondes (ms) ont été supprimés (considérés comme une non-réponse), puisque une réponse motrice ne peut pas être aussi rapide. Nous avons réalisé une analyse statistique sur les performances (taux d'erreurs : TE et temps de réponse : TR) obtenues par les patients HLHg et HLHd ainsi que par les contrôles. Les résultats mettent en évidence : tout d'abord concernant la tâche de détection nous observons que les contrôles font moins d'erreurs et détectent plus rapidement les scènes dans le champ visuel gauche que dans le champ visuel droit. Il y a un effet important de la présence de la cible : les résultats font ressortir que les participants ont plus de difficultés à détecter l'absence de la cible, que sa présence. Notons, un effet du champ visuel de présentation, chez les contrôles. Les performances des contrôles (âge et sexe confondus) sont meilleures dans le champ visuel central que dans les champs gauche et droit. Concernant la tâche de catégorisation, pour les scènes non filtrées il n'y a pas d'effet du champ visuel de présentation. Les temps de réponses obtenus par les patients HLHd font ressortir un traitement plus rapide des villes par rapport aux forêts dans le CV gauche (sain). En revanche, les temps de réponse obtenus par les patients HLHg sont plus longs par rapport à ceux obtenus par les contrôles quel que soit le type de scène (ville ou forêt). Chez les patients HLHg (lésion droite) par rapport aux contrôles nous observons : dans le champ visuel droit (sain pour les patients HLHg), les patients font plus d'erreurs et sont plus lents que les contrôles pour traiter les basses fréquences, les hautes fréquences et les scènes non-filtrées, par rapport aux contrôles. Chez les patients HLHd (lésion gauche) par rapport aux contrôles, nous constatons que les patients hémianopsiques droit font particulièrement plus d'erreurs pour traiter les hautes fréquences spatiales par rapport aux contrôles. Dans le CV gauche (sain pour ces patients) : les patients traitent aussi bien que les contrôles les basses fréquences et les scènes non-filtrées. En revanche ils font plus d'erreurs que les contrôles pour traiter les hautes fréquences. De plus ils obtiennent des temps de réponse plus courts pour traiter les basses fréquences par rapport aux hautes fréquences dans le champ visuel gauche. Dans leur champ visuel aveugle les patients font moins d'erreurs pour traiter les basses fréquences que les hautes fréquences ; les temps de réponse sont également plus courts pour traiter les basses que les hautes fréquences.

5. Discussion

5.1. Effet des Fréquences Spatiales

Les patients hémianopsiques obtiennent un profil comparable à celui obtenu par les contrôles dans le champ visuel sain : les basses fréquences sont aussi bien traitées que les scènes non-filtrées, et les basses fréquences sont mieux traitées que les hautes fréquences.

5.2. Effet du type de scène

Les temps de réponses obtenus par les patients HLHd font ressortir un traitement plus rapide des villes par rapport aux forêts dans le CV gauche (sain). En revanche, les temps de réponse obtenus par les patients HLHg sont plus longs par rapport à ceux obtenus par les contrôles quel que soit le type de scène (ville ou forêt). Ce résultat met en évidence un ralentissement global pour ces patients (HLHg) ce qui souligne l'effet important d'une lésion droite.

5.3. Champ visuel sain des patients HLH

Nous allons discuter les capacités de catégorisation des patients hémianopsiques dans le CV sain, d'abord pour les patients HLHg (lésion droite) puis pour les patients HLHd (lésion gauche).

-Dans le champ visuel droit (sain pour les patients HLHg), les patients font plus d'erreurs et sont plus lents que les contrôles pour traiter les basses fréquences. Ce résultat va dans le sens de notre hypothèse et souligne les répercussions d'une lésion droite sur le traitement des basses fréquences dans le champ visuel sain. En effet, certains auteurs (Delis et *al.*, 1986) ont remarqué que les patients porteurs d'une lésion cérébrale droite rencontrent des difficultés dans le traitement global. Les patients HLHg font également plus d'erreurs et sont plus lents pour traiter les hautes fréquences et les scènes non-filtrées, par rapport aux contrôles. On peut expliquer ce résultat en s'aidant des observations de Grabowska, Semenza, Denes et Testa (1989), selon lesquelles une lésion droite peut avoir des effets à la fois au niveau du traitement des hautes et des basses fréquences. Le cortex visuel droit semble donc être impliqué à la fois dans le traitement des hautes et des basses fréquences spatiales. De plus, Peyrin et *al.*, (2006b), ont observé une certaine dynamique de cette spécialisation hémisphérique des fréquences spatiales. En effet le temps de présentation des scènes influence ce phénomène de spécialisation. Lorsque le temps de présentation est

de 150 ms, ces auteurs observent un avantage de l'hémisphère droit pour l'ensemble des fréquences spatiales. Ici, nous observons chez ces patients HLHg, cérébro-lésés droit une gêne dans le traitement à la fois des hautes et des basses fréquences avec un temps de 100ms.

Il semblerait donc que, lorsque le temps de présentation est de 100ms, le cortex visuel droit soit spécialisé à la fois dans le traitement des hautes et des basses fréquences.

Chez les patients HLHd (lésion gauche) par rapport aux contrôles, nous constatons que les patients HLHd font particulièrement plus d'erreurs pour traiter les hautes fréquences spatiales par rapport aux contrôles.

Dans le CV gauche (sain pour ces patients HLHd) : les patients traitent aussi bien que les contrôles les basses fréquences et les scènes non-filtrées. En revanche ils font plus d'erreurs que les contrôles pour traiter les hautes fréquences. De plus ils obtiennent des temps de réponse plus courts pour traiter les basses fréquences par rapport aux hautes fréquences dans le champ visuel gauche, ce résultat souligne que ces patients gardent une spécialisation hémisphérique dans le champ visuel sain, ce qui est compatible avec leur hémisphère droit sain.

Nous remarquons que les patients HLHg (lésion droite) font plus d'erreurs et sont moins rapides que les patients HLHd (lésion gauche). Grabowska et *al.*, (1989) ont observé chez des patients cérébro-lésés droit et gauche, lors d'une tâche de discrimination de réseaux (en hautes et en basses fréquences spatiales) que les patients hémianopsiques gauche (lésion droite) font plus d'erreurs de discrimination que les patients hémianopsiques droit (lésion gauche). Ce résultat suggère qu'une lésion du cortex visuel primaire droit entraînerait plus de difficulté dans le traitement des fréquences spatiales, qu'une lésion gauche.

5.4. Champ visuel aveugle des patients HLH

Discutons maintenant les performances obtenues par les patients dans leur champ visuel aveugle, en d'autres termes des capacités visuelles résiduelles. Nous remarquons que dans leur champ visuel aveugle les patients font moins d'erreurs pour traiter les basses fréquences que les hautes fréquences ; les temps de réponse sont également plus courts pour traiter les basses que les hautes fréquences. De plus, les temps de réponse pour traiter les basses fréquences sont plus rapides dans le CV aveugle que voyant. Ce résultat peut aller dans le sens de l'hypothèse selon laquelle le *blindsight* serait véhiculé par un réseau

secondaire impliquant la voie magnocellulaire spécialisée dans le traitement des basses fréquences. Par ailleurs, les patients sont aussi rapides pour donner une réponse dans leur champ visuel central/sain/aveugle, ceci reflète qu'ils parviennent à traiter aussi vite en choix forcé, dans leur champ visuel aveugle bien qu'ils n'aient pas conscience du stimulus qu'ils traitent.

Nous notons que les patients HLHd (lésion gauche) ne traitent pas plus vite les hautes fréquences que les patients HLHg (lésion droite), contrairement à nos attentes.

Lorsque nous comparons chez les patients hémianopsiques, la tâche de détection à la tâche de catégorisation qui constitue notre tâche de choix forcé on peut alors répondre à notre question qui était la suivante : Est-ce que les performances de catégorisation de scènes naturelles peuvent être meilleures que les performances de détection révélant ainsi un phénomène de *blindsight* ?

Les patients font plus d'erreurs dans leur champ visuel aveugle par rapport à leur champ visuel voyant. Nous n'observons pas d'effet du type de tâche. Cependant lorsque nous analysons les résultats obtenus pour les villes séparément des forêts nous faisons l'observation suivante :

- Pour les villes (dans le CV aveugle) : les patients HLHd (lésion gauche) obtiennent des performances identiques en détection et en catégorisation. En revanche, les patients HLHg (lésion droite) obtiennent de meilleures performances pour catégoriser que pour détecter.
- Pour les forêts (dans le CV aveugle) : nous obtenons le profil inverse, c'est-à-dire que les patients HLHd (lésion gauche) obtiennent de meilleures performances pour catégoriser que pour détecter. En effet, les courbes des performances obtenues par les patients HLHd (lésion gauche) mettent en évidence que pour la tâche de détection les performances des patients chutent dans leur CV aveugle, alors que pour la catégorisation leurs performances sont identiques dans le CV voyant et aveugle. Ce résultat évoque des capacités de *blindsight* pour la tâche de catégorisation. Ceci principalement pour les forêts chez les patients HLHd (lésion gauche) et pour les villes chez les patients HLHg (lésion droite).

6. Conclusion

Pour conclure, nous notons que les patients HLHg (lésion droite) obtiennent de moins bonnes performances que les contrôles et ce même dans le CV sain, à la fois pour les BFS, HFS et NF. Les patients HLHd (lésion gauche) présentent, quant à eux, une gêne principalement pour le traitement des HFS par rapport aux contrôles. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une lésion du cortex visuel primaire droit aurait plus de répercussions sur le traitement des fréquences spatiales, qu'une lésion gauche. De plus on remarque que les patients HLHg rencontrent des difficultés pour traiter les scènes à la fois dans leur CV sain, et aveugle, alors que les HLHd parviennent à traiter les scènes dans leur CV sain de façon identique aux contrôles.

Les patients hémianopsiques font preuve de capacités visuelles résiduelles dans leur CV aveugle, au dessus du seuil du hasard dans la tâche de catégorisation (choix forcé). On note ce phénomène de *blindsight* principalement chez les patients HLHd (lésion gauche). Il semble être spécifique au traitement des BFS, ce qui pourrait sous-entendre que les scènes sont traitées de manière inconsciente, par une voie résiduelle, sous-corticale, qui véhiculerait les BFS.

En observant les données cliniques des patients et en calculant le volume des lésions ainsi que leur topographie, nous pouvons conclure au fait qu'il existe un effet de la latéralisation de la lésion dès le cortex visuel primaire. Par conséquent les différences obtenues entre les patients HLHg et HLHd, vont en faveur de notre hypothèse sur la spécialisation hémisphérique. Il semble donc intéressant de poursuivre cette étude à l'aide d'imagerie cérébrale, afin de voir si cette différence comportementale s'accompagne d'une différence d'un point de vue de la réorganisation cérébrale à la suite de la lésion, à savoir une activité cérébrale différente selon la latéralisation de la lésion qui expliquerait la différence obtenue sur le plan comportemental.

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer les répercussions d'une lésion au niveau du cortex visuel primaire chez des patients hémianopsiques et la spécialisation hémisphérique dans le traitement des fréquences spatiales de scènes naturelles. En effet, de nombreuses études ont

montré l'existence d'une spécialisation hémisphérique pour le traitement des fréquences spatiales, et ce dès le cortex visuel primaire. Cela se traduirait par un traitement préférentiel des basses fréquences spatiales par l'hémisphère droit et par un traitement préférentiel des hautes fréquences spatiales par l'hémisphère gauche. Nous nous interrogeons donc sur l'effet d'une lésion au niveau du cortex visuel primaire en fonction de sa latéralisation (droite ou gauche) sur la spécialisation hémisphérique, mais également sur le phénomène de *blindsight*, qui caractérise les capacités visuelles résiduelles dans le champ aveugle des patients hémianopsiques. Nous avons utilisé une tâche de reconnaissance de scènes naturelles (ville et forêt) filtrées, soit en fréquences spatiales hautes, soit en fréquences spatiales basses, soit non-filtrées. Les scènes sont présentées dans le champ visuel central, droit et gauche, durant 100 ms, dans un ordre pseudo-aléatoire. Les patients hémianopsiques gauche (à la suite d'une lésion du cortex visuel droit), présentent des difficultés dans le traitement à la fois des HFS et des BFS. Les patients hémianopsiques droit (à la suite d'une lésion gauche) présentent principalement des difficultés dans le traitement des HFS. De plus les patients obtiennent des performances au-dessus du hasard lors de cette tâche de catégorisation des scènes, dans leur CV aveugle d'autant plus que les scènes sont en BFS. Cela peut sous-entendre que les BFS véhiculées principalement par la voie sous-corticale, permettrait un traitement inconscient d'une scène visuelle complexe.

Globalement, les résultats présentés précédemment, lors d'études en champ central et en champ latéralisés mettent en évidence que l'hémianopsie consécutive à une lésion post-chiasmatique est associée à un déficit pour le processus de détection ou de catégorisation selon la latéralisation de la lésion. Une lésion des aires visuelles droites induit un déficit lors de la détection mais aussi de la catégorisation, alors qu'une lésion des aires visuelles gauches induit majoritairement un déficit lors de la catégorisation. De plus, le champ visuel central et le champ visuel non amputé considérés comme intacts chez les patients HLH ne sont pas autant préservés que ce qui est souvent pensé. Ainsi la mise en place d'une rééducation adaptée pour les patients HLH, nécessitera également un entraînement du champ visuel central et du champ visuel du « sain » en plus de la stimulation du champ aveugle.

PARTIE 3

Plasticité cérébrale, de la
neuro-imagerie fonctionnelle
à l'approche
neuropsychologique

CHAPITRE 1 : REORGANISATION CERVEbraLE APRES LESION DE L'ŒIL OU DU CERVEAU

Nous allons aborder dans ce chapitre, le phénomène de la plasticité cérébrale. Tout d'abord chez le sujet sain en présentant l'effet du développement cérébral, mais également l'effet de l'apprentissage à la fois chez l'enfant et chez l'adulte sur la plasticité. Puis nous présenterons les études mettant en évidence cette plasticité chez des patients souffrant de lésions. Nous verrons dans ce cas, l'effet d'une lésion du système visuel périphérique et du système visuel central sur la réorganisation cérébrale, et enfin le lien qui s'entretient de manière très fine entre la plasticité cérébrale et la récupération d'une fonction perdue à la suite d'une lésion.

I. Plasticité cérébrale

Il y a un peu plus d'un demi-siècle, les premières études sur la plasticité cérébrale furent initiées par Donald Hebb et postulaient que les connexions neuronales sont consolidées, renforcées et remodelées par notre expérience (1947). Il observa par exemple que les rats qui étaient autorisés à courir librement chez lui, avaient de meilleures capacités mnésiques que les rats enfermés en cage de laboratoire.

1. Plasticité cérébrale : chez l'enfant et chez l'adulte sain sous influence de l'apprentissage

Les études portant sur la plasticité cérébrale ont permis de mettre en évidence qu'à la suite d'un entraînement régulier pour une tâche donnée on observe une réorganisation corticale des aires impliquées pour la réalisation de la tâche en question. Elle peut survenir suite à la pratique ou à l'apprentissage d'une tâche précise (Jenkins, Merzenich, Ochs, Allard et Guic-Robles, 1990). Ces études sur la plasticité cérébrale ont été menées entre autre chez le musicien, car l'exposition précoce à la musique façonne le cerveau, et c'est pourquoi le

cerveau des musiciens a été utilisé comme modèle pour la plasticité cérébrale (Munte et *al.*, 2000). Il a été montré une modification des aires somatosensorielles des doigts au sein du cortex moteur des musiciens par rapport à des non-musiciens. Particulièrement, chez les musiciens ayant commencé l'apprentissage du piano avant l'âge de sept ans, chez qui on retrouve un développement plus marqué au niveau du corps calleux antérieur qui connecte les aires frontales motrices et les régions préfrontales gérant la coordination bi-manuelle motrice, alors que chez les pianistes ayant commencé plus tard ou chez les non musiciens on n'observe pas ce développement particulier au niveau du corps calleux (Schlaug et *al.*, 1994). L'exemple des taxis londoniens, image très bien ce phénomène de plasticité cérébrale chez l'adulte, en effet chez les conducteurs entraînés durant deux ans, le volume de la matière grise au niveau de l'hippocampe droit postérieur, qui gère le stockage des représentations spatiales, est plus important que chez les sujets témoins (Maguire et *al.*, 2000). Un autre facteur déterminant pour la plasticité cérébrale et découlant d'observations semblables à la précédente, c'est l'effet de l'âge, avec certaines périodes critiques dans le développement neuronal.

1.1. Périodes critiques

Ces périodes critiques sont des périodes durant lesquelles les circuits neuronaux affichent une très grande sensibilité aux stimuli extérieurs et sont fortement façonnés par l'environnement. La plasticité est à son apogée durant ces fenêtres temporelles de périodes critiques, qui sont essentielles au bon développement du système sensoriel (Hensch, 2004). Les facteurs physiologiques expliquant le déclin de la plasticité à la suite de la période critique sont encore peu connus (Berardi et *al.*, 2003). Cependant certaines hypothèses sont émises : telle que la maturation de la myéline (McGee et *al.*, 2005). En effet la myéline au niveau du système nerveux central a un effet sur certaines protéines qui inhibent la croissance axonale, ou qui déclenchent la maturation de l'inhibition intra-corticale (Hensch et *al.*, 2005). De nombreux auteurs évoquent que ce dernier facteur est un élément clé à la fois pour la régulation des périodes critiques mais aussi pour la plasticité lors de la restauration du système visuel adulte (Spolidoro et *al.*, 2009). La maturation des circuits inhibiteurs est connue pour être le facteur le plus contraignant, limitant la période critique pour la plasticité du système visuel que nous détaillerons dans la partie suivante.

1.2. Effet de l'âge

Ce phénomène de plasticité est influencé par le facteur « âge ». En effet, des études en TEP et en IRMf indiquent que les personnes âgées, dans le cadre d'une tâche motrice, sollicitent un nombre plus important de régions corticales par rapport aux sujets jeunes, pour réaliser une même tâche (Cabeza et *al.*, 2004). Ceci sans différence au niveau de la précision des réponses mais avec un temps d'exécution plus important, soulignant l'effet normal de l'âge (Ward et *al.*, 2003), c'est-à-dire que pour réaliser une même tâche et pour obtenir les mêmes performances les personnes âgées mobilisent plus d'aires cérébrales que les personnes plus jeunes. De même que pour une tâche de mémoire épisodique, il a été observé que les personnes âgées activaient les mêmes aires que les personnes plus jeunes mais avec une sollicitation bilatérale des régions préfrontales qui n'est que unilatérale gauche chez les jeunes (Cabeza et *al.*, 2004).

Les recherches actuelles confirment la persistance d'une certaine plasticité cérébrale chez l'adulte. Ce qui conforte alors l'idée que les circuits nerveux et les synapses sont malléables. Concrètement, une zone du cortex sensoriel qui ne reçoit plus d'informations sensorielles devient alors capable de traiter des informations en provenance des régions voisines, si et seulement si il n'y a pas de lésion corticale, bien évidemment.

D'autre part, il y a une trentaine d'années l'idée dominante proposait que plus tôt était acquise une lésion mieux serait récupérée la fonction perdue à la suite de cette lésion. Signifiant que si le déficit est pris en charge ou disparaît tôt dans le développement, alors une récupération complète de la fonction serait possible alors que la récupération serait plus limitée lorsque le trouble est éliminé plus tard comme à l'âge adulte par exemple (Prusky et Douglas 2003). Par conséquent, pendant longtemps, et principalement à la suite des travaux de Kennard (1936) on a pensé que les déficits étaient moins sévères si la lésion survenait tôt chez le jeune enfant. En effet, elle a démontré chez le singe que les effets d'une lésion au niveau du cortex frontal touchant les aires motrices sont moins importants et plus facilement compensés lorsque l'animal est jeune. Pourtant il semble que les atteintes chez l'enfant soient souvent plus sévères et moins régressives que chez l'adulte (Ducarne et *al.*, 1981) : « la récupération est d'autant meilleure que la lésion est plus précoce » (Kennard, 1936) est à tort une pensée prépondérante. En effet, si l'atteinte est diffuse, l'inverse est souvent constaté : plus le patient est jeune, et plus les conséquences sont graves. La relation inverse qui existe entre l'étendue de la lésion et la récupération est un principe plus fidèle.

Les atteintes étendues de la substance blanche donnent souvent des séquelles cognitives plus globales. L'atteinte des noyaux sous-corticaux et des faisceaux spécifiques de la substance blanche permettent une moindre récupération que les atteintes corticales. Le « diaschisis » post-lésionnel explique probablement la plupart des récupérations rapides. En cas de lésion hémisphérique chez le jeune enfant, le transfert rapide sur l'autre hémisphère est probablement dû à une substitution fonctionnelle et à la libération de représentations neurales redondantes homotypiques. Les troubles chez l'enfant à la suite d'une lésion cérébrale sont donc moins purs, moins spécifiques que chez l'adulte du fait de la moins grande spécialisation du cortex au moment où arrive la lésion, et va entraver le développement du cerveau pendant les « périodes critiques » de développement. Abordons maintenant ce phénomène de plasticité à la suite d'une lésion du système visuel.

2. Plasticité cérébrale : en cas de lésion

Chez l'humain de nombreuses recherches sur la plasticité neuronale, à la suite d'une lésion du cortex ont été menées principalement chez des patients atteints de troubles moteurs ou du langage. Il a été observé à la suite de l'ablation de l'hémisphère gauche chez des patients atteints d'épilepsie pharmaco-résistantes une récupération complète du langage, ou à la suite d'AVC engendrant un déficit moteur (hémiparésie) une récupération complète ou quasi complète soulignant d'un point de vue clinique une probable réorganisation corticale. Quelques études longitudinales notamment sur la récupération de l'utilisation de la main post-AVC, en IRMf (Marshall et *al.*, 2000) et en TEP (Calautti et *al.*, 2001) ont observé une réorganisation bi-hémisphérique durant le mouvement de la main déficitaire, c'est-à-dire une activation du cortex moteur primaire controlatérale à la main comme chez les participants témoins, mais aussi une activation ipsilatérale concomitante à la récupération motrice. De nombreux facteurs semblent cependant influencer ce phénomène de plasticité cérébrale et ceux-ci sont tous en interaction, tels que : l'âge du sujet, le type de lésion (l'étiologie ainsi que sa localisation et son étendue) la gravité des troubles sur le plan clinique, l'environnement et la prise en charge, et enfin la motivation du patient (Seron, 1979). Dans le domaine de la pathologie, on sait maintenant que toutes les perturbations motrices et/ou sensorielles sont caractérisées par des changements des cartes motrices et sensorielles (Flor et Diers, 2009). Pourtant, pendant des années on a pensé que les aires sensorielles étaient unimodales, ce courant certainement fortement influencé par les travaux de Franz Gall à la fin du XVIII siècle postulait que des facultés mentales

différentes pouvaient être localisées dans des régions cérébrales différentes (Springer et Deutsch, 2000). Depuis, de nombreuses études ont mis en évidence que des aires sensorielles que l'on croyait jusque là unimodales, avaient la capacité d'intégrer plusieurs modalités (Van Essen, 1998). Poremba et *al.*, 2003 ont mis en évidence chez le macaque que le cortex préfrontal, pariétal et temporal possèdent des neurones multimodaux. Duhamel (1998) a pu définir des neurones bi-modaux répondant à des stimulations tactiles et visuelles, au niveau du cortex pariétal. Chez l'homme des études à l'aide de l'IRMf (Bremmer et *al.*, 2001) ont retrouvé également des activations préfrontales et pariétales à la suite de stimulation visuelles et tactiles. Chez l'homme l'aire 19 de Brodmann qui est une partie du cortex visuel primaire, que l'on pensait uniquement dédiée à la vision, s'active lors de la discrimination de stimulations tactiles (stimulation allant dans un sens puis dans l'autre). Cette activation pourrait s'expliquer par une représentation mentale du mouvement des stimuli, qui par conséquent sollicite une image mentale et active l'aire visuelle. Mais, les auteurs, pour appuyer leur hypothèse selon laquelle AB 19 est multimodale, ont utilisé la TMS au niveau de cette aire en question lors de la réalisation de la même tâche de discrimination tactile. Durant l'inactivation de cette aire corticale, les performances des participants chutent sévèrement, ce qui laisse penser que ces aires ont bien un rôle dans la perception somesthésique aussi. Ce caractère multimodal des aires sensorielles corticales permet de mieux comprendre le phénomène de plasticité.

Cette plasticité cérébrale repose sur une plasticité synaptique. En 1983, Merzenich et *al.* apportent des preuves à l'effet que le cortex somatosensoriel primaire de singes adultes peut compenser les pertes subies à la suite d'une lésion. En effet, la représentation topographique de la surface de la peau se réorganise de sorte que le champ récepteur des neurones avoisinant les neurones déafférentés s'agrandit pour inclure la région de la peau qui a été mis sous silence. Plus tard, plusieurs chercheurs ont démontré que cette réorganisation topographique n'est pas conditionnelle à la déafférentation et qu'elle peut se manifester dans d'autres modalités sensorielles.

Nous allons donc nous intéresser maintenant, tout particulièrement à la plasticité du système visuel. Le phénomène de plasticité neuronale a été mis en évidence à la suite d'études chez des êtres vivants souffrant d'atteintes lésionnelles d'origines soit périphérique c'est-à-dire de l'œil ou du nerf optique (atteinte du globe oculaire, de la rétine, du nerf optique) soit d'origine centrale, c'est-à-dire des voies visuelles ou des aires visuelles cérébrales (atteinte retro-chiasmatique, du cortex visuel primaire par exemple).

Cette plasticité a été mise en évidence par d'impressionnantes capacités de récupération du système nerveux central, à la fois chez l'enfant mais aussi chez l'adulte et la personne âgée. Elle semble possible à la suite de différents types de lésions (périphériques ou centrales). Ce qui a initié cette vague de recherche concernant la plasticité cérébrale, découle du fait qu'à la suite d'une atteinte du système nerveux on remarque sur le plan comportemental une régression des déficits fonctionnels avec une modification des comportements aboutissant à une récupération partielle ou totale des déficits.

Le système visuel adulte fait preuve de plasticité fonctionnelle et ce quel que soit le niveau du traitement : depuis les photorecepteurs (Smallman, MacLeod, et Doyle, 2001) jusqu'aux aires corticales de haut niveau (Zohary, Celebrini, Britten, et Newsome, 1994). Le système visuel adulte a la capacité de modifier sa réponse à la suite d'une déprivation sensorielle (Hubel et Wiesel, 1970), d'un développement anormal comme l'amblyopie (Belkin et Sagi, 2004), d'une dégénérescence maculaire liée à l'âge (Burke, 1999), d'une névrite optique (Levin et *al.*, 2006), d'une lésion occipitale unilatérale (Huxlin et *al.*, 2008) (Voir figure 56 pour l'illustration des différents sites lésionnels).

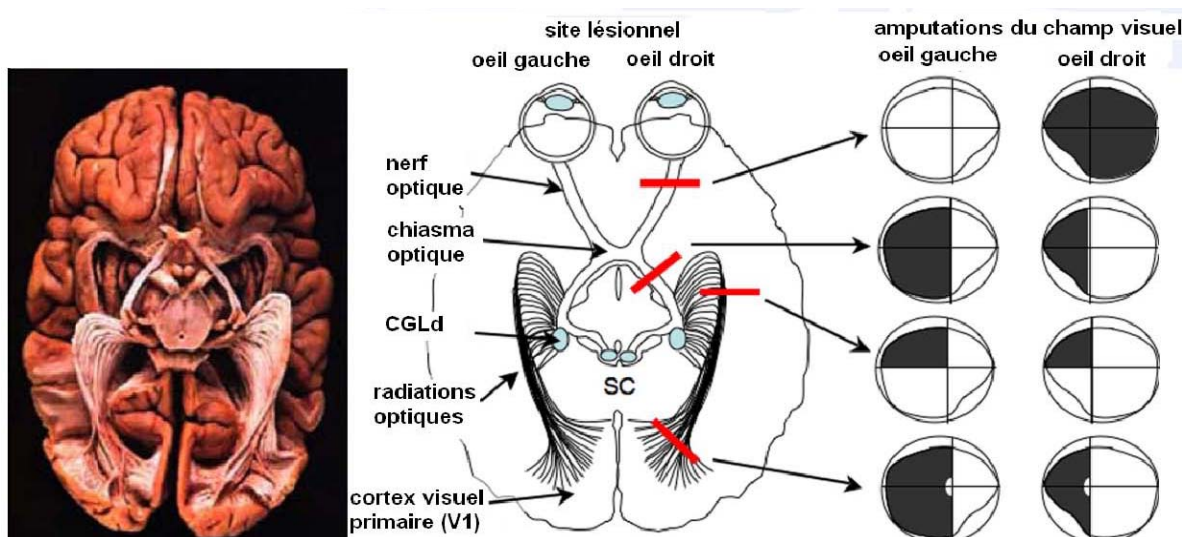


Figure 56 : Vue ventrale du système visuel humain, illustrant les différents sites lésionnels (barre rouge sur le schéma du centre) à différents niveaux du système, occasionnant une amputation du champ visuel. L'illustration ne présente que les lésions au niveau de l'hémisphère droit, mais ceci est parfaitement symétrique, et pourrait être au niveau de l'hémisphère gauche ou voir même bilatéral. Il faut noter que pour une lésion bilatérale, il y a un effet bilatéral au niveau du champ visuel, c'est-à-dire touchant le champ visuel des 2 yeux, dès l'instant que le chiasma optique est passé. [CGLd : Corps genouillé latéral dorsal, SC : colliculus supérieur]. Figure tirée de Huxlin 2008.

2.1. Plasticité cérébrale à la suite d'une lésion périphérique du système visuel

Nous allons détailler lors de cette première partie les différentes études menées sur le sujet, à la suite de diverses lésions de l'œil jusqu'au nerf optique.

2.1.1. Lésion de l'œil

Evoquons tout d'abord les atteintes au niveau de l'œil lui-même. Une des premières démonstrations du rôle joué par l'expérience visuelle précoce sur le développement des neurones visuels et sur le comportement visuo-moteur a été apportée par Hubel et Wiesel (1963) dès le début des années soixante. Comme précédemment décrit, ils ont montré qu'il existe une période de plasticité entre la naissance et l'âge adulte, durant laquelle la privation visuelle (réalisée par la suture des paupières de l'œil d'un chaton à 10 jours et ce pendant 2 mois et demi) produit un déficit cortical. Ainsi, les chatons vivant dans un monde composé uniquement de bandes verticales semblent aveugles aux lignes horizontales. Une étude plus récente, chez le chat aussi (Rauschecker et Korte, 1993) a montré à l'aide de l'enregistrement de l'activité des neurones au niveau du cortex visuel, auditif et somatosensoriel, qu'à la suite d'une déprivation sensorielle visuelle de plusieurs années (4 chats rendus aveugle par suture des yeux à l'âge de 10 jours ont été comparé à deux chats sans suture) les neurones normalement dédiés à la vision sont activés chez ces chats en réponse à des stimuli auditifs ou somatosensoriels. De plus les neurones du cortex auditif font preuve d'une plus grande sensibilité pour la localisation spatiale des sons par rapport à ceux des chats n'ayant pas subi de déprivation. Ces résultats suggèrent qu'à la suite d'une cécité visuelle causée par une déprivation sensorielle expérimentale, il existe des mécanismes neuronaux qui permettent une plasticité compensatoire intermodale. Nous évoquons alors brièvement la notion de vicariance : les aires dédiées à la fonction sensorielle déficitaire sont mobilisées pour les autres modalités sensorielles. De la même manière, chez l'humain de nombreux travaux montrent que la privation de vision ou d'audition est en partie compensée par le « sur-développement » d'autres modalités sensorielles. Par exemple il a été constaté que des personnes souffrant de cécité visuelle périphérique depuis la naissance obtiennent des performances à la fois plus précises et plus rapides que des voyants lors de tâches de localisations de cibles sonores (Lessard *et al.*, 1998) et lors de certaines épreuves de discrimination tactile (e.g., manipulation d'objets, lecture du braille, reconnaissance tactile d'objet, de textures) (Cohen *et al.*, 1997).

Dans l'étude de Lessard et *al.*, (1998), les capacités de localisation spatiales auditives ne diffèrent pas entre les voyants et les aveugles en condition d'écoute binaurale. En revanche dans la condition de présentation monaurale les aveugles gardent le même profil de réponse qu'en présentation binaurale, alors que les voyants ont des performances très chutées. Un autre résultat impressionnant permettant d'illustrer cette dernière idée est le suivant : la stimulation des aires postérieures occipitales et plus précisément du cortex visuel primaire, à l'aide de la TMS chez les participants aveugles congénitaux, entraîne un nombre d'erreur plus importants par rapports aux participants témoins, lors des tâches de reconnaissance tactiles. De plus, la stimulation par TMS des aires sensorimotrices entraîne chez les participants témoins une augmentation d'erreur plus importante, que chez les participants aveugles, lors de la reconnaissance tactile. Ces résultats suggèrent une utilisation du cortex visuel durant des tâches tactiles chez les aveugles congénitaux.

Des études utilisant d'autres techniques telles que l'IRMf vont dans le même sens que ces dernières recherches. En effet, l'IRMf semble être une technique permettant de suivre une forme de plasticité ou du moins une réorganisation post-lésionnelle. Sadato et *al.*, (2002) ont mis en exergue une sollicitation des aires visuelles postérieures accrue chez les aveugles lors d'une tâche tactile, par rapport à des participants voyants (*Cf* figure ci-dessous). Sadato et *al.*, (1996) et Sadato (2005) ont mis en évidence lors de la lecture du braille des activations au sein des aires visuelles primaires (V1). Cependant ce résultat est très discuté puisque la cohorte des participants de cette étude n'est pas constituée que d'aveugles de naissance. Par conséquent on peut se demander si ces activations obtenues au niveau de V1 ne sont pas le fruit de l'imagerie mentale visuelle des mots qui leur restent. En réponse à cela, Hamilton et Pascual-Leone (1998) à l'aide de la TMS ont réalisé une tâche de lecture de braille, chez deux groupes de participants : un groupe témoin (lisant le braille) et un groupe d'aveugle. Dans une condition ils ont appliqué la TMS au niveau des aires somesthésiques : dans ce cas les témoins font beaucoup d'erreurs de lecture, et les aveugles aucune erreur. Dans la seconde condition la TMS est appliquée au niveau du cortex visuel primaire et dans ce cas les témoins ne font aucune erreur et les aveugles énormément. Ce qui met bien en évidence ce principe de vicariance comme évoqué dans les études de Sadato (1996, 2002, 2005), que le cortex visuel primaire qui n'est pas dédié à la vision chez les aveugles a la capacité de traiter d'autres informations, dans une modalité qu'on ne lui pensait pourtant pas dédiée. La présence de connexions hétéromodales permet d'expliquer ce phénomène de réorganisation.

La plasticité intermodale a été démontrée à l'aide de l'IRMf, en effet chez les aveugles précoces on peut observer une activation du cortex occipital suite à l'exécution de tâches tactiles comme la lecture du braille (Figure 57) (Sadato et *al.*, 1996 ; Sadato et *al.*, 1998 ; Cohen et *al.*, 1999 ; Merabet et Pascual-Leone ; 2010) (Figure 58). La plasticité intermodale se manifeste effectivement de façon différente chez les aveugles précoces et tardifs comme démontré par Sadato et *al.* (2002). De plus, l'utilisation de la TMS au niveau du cortex visuel perturbe la lecture du braille chez les aveugles précoces contrairement aux individus voyants et aux aveugles tardifs chez qui la lecture continue à être effectuée sans difficulté (Cohen et *al.*, 1999).

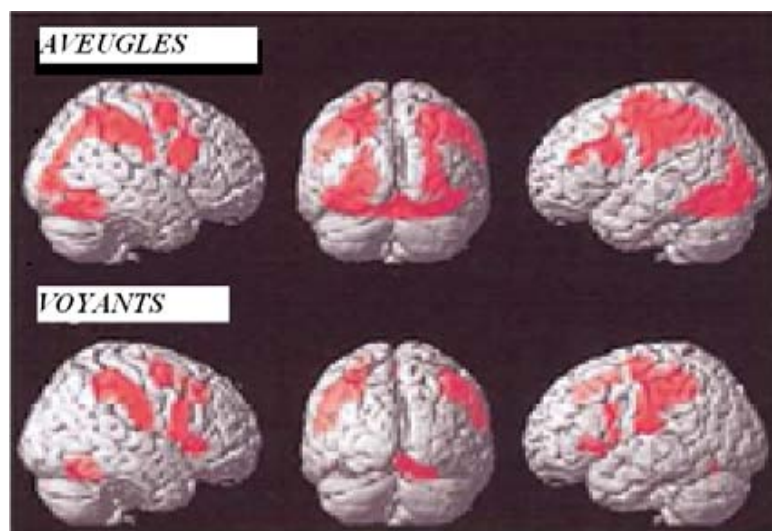


Figure 57 : Le braille est codé au niveau du cortex somesthésique chez les voyants (alors que l'identification des lettres lors de la lecture est codée au niveau du cortex occipital). Le cortex visuel chez les aveugles de naissance est dédié à la lecture du braille, soulignant la capacité du cortex à traiter une information sensorielle pour laquelle il n'était pas dédié. (Figure tirée de Sadato et *al.*, 2002).

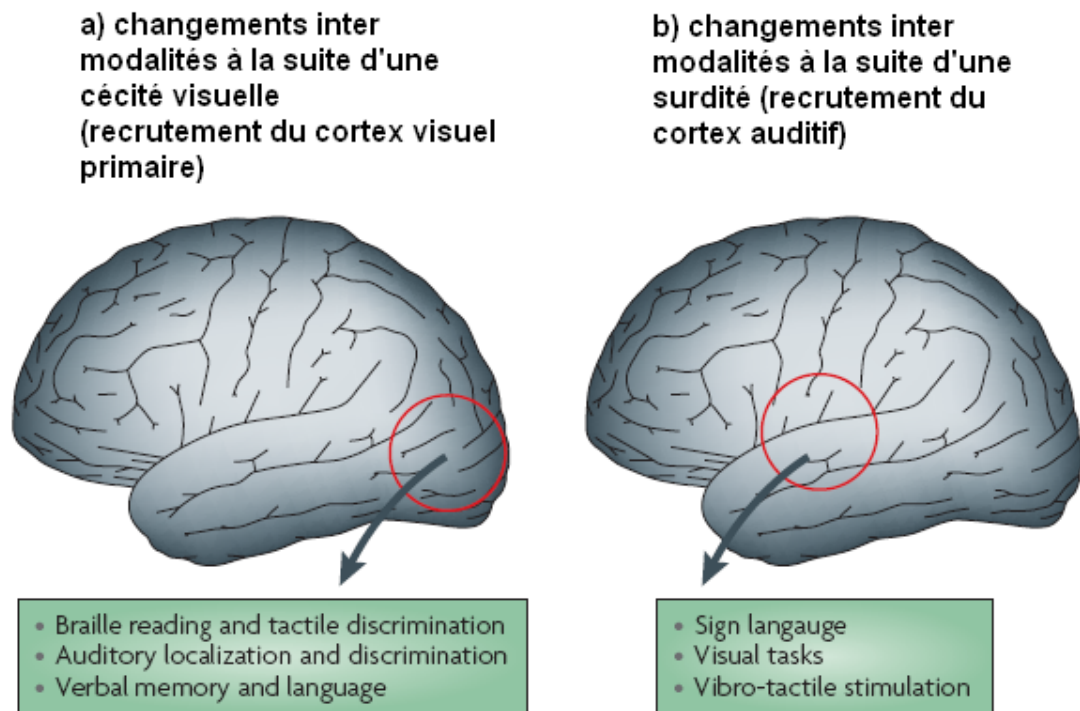


Figure 58 : Résumé de la plasticité neuronale inter-modalité, à la suite de la perte d'un sens. Recrutement du cortex visuel chez des patients aveugles pour le traitement du touché lors de la lecture du braille, de la localisation et de la discrimination de sons, et lors de tâche de mémoire verbale. Recrutement du cortex auditif et des aires de la compréhension du langage lors du traitement du langage des signes et de tâches visuelles (Figure tirée et modifiée de Merabet et Pascual-Leone, 2010).

Sadato et *al.*, (2002) évoquent la notion de période critique comme facteur influençant le phénomène de plasticité. Ils ont observé à l'aide d'une étude en IRMf que les aveugles congénitaux sollicitaient les aires visuelles primaires de manières bilatérales lors d'une tâche de discrimination tactile, sous-entendant que les cortex occipitaux droit et gauche peuvent-être dédiés à la modalité du toucher, alors que chez des aveugles atteints de cécité de manière plus tardive, un seul hémisphère est activé lors d'une tâche de discrimination tactile (Figure 59).

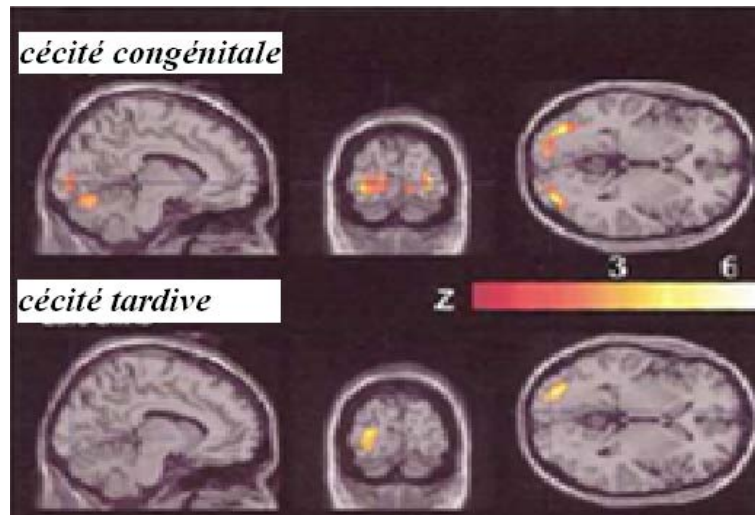


Figure 59 : Comparaison des activations chez des aveugles congénitaux/tardifs lors d'une tâche de discrimination tactile. Les aveugles congénitaux activent leur cortex visuel primaire de manière bilatérale lors de la stimulation tactile alors que les aveugles plus tardifs sollicitent le cortex visuel primaire que de manière unilatérale pour la même tâche. (Tirée de Sadato et *al.*, 2002).

Cette idée de période critique est aussi corroborée par des études physiologiques comme celle de Hubel et Wiesel (1970) sur le développement du cortex visuel primaire du chat. Comme décrit précédemment, ils démontrèrent que les effets dégénératifs de l'obstruction d'un œil sur des cellules monoculaires du chaton étaient irréversibles une fois l'âge de maturité atteint. Malgré le fait que le cerveau en développement soit plus plastique que le cerveau adulte, les connexions neuronales restent modulables par l'expérience de tâches cognitives spécifiques. Cette vague d'études en IRMf sur la représentation multisensorielle du cortex visuel primaire reste très controversée. En effet, le cortex visuel primaire est connu pour être impliqué dans le processus d'image mentale visuelle provoqué par toutes les modalités sensorielles.

Cependant, si le cortex visuel est vraiment impliqué lors du toucher, cela peut être la base de la plasticité observée entre les modalités sensorielles, notamment chez les aveugles congénitaux. Amedi et *al.*, (2010), à l'aide de l'IRMf, ont comparé les patterns d'activation lors d'une tâche de reconnaissance tactile d'objets, dans la main gauche ou dans la main droite (sans le contrôle de la vision) chez 8 participants sains et chez 8 aveugles de naissance. Ils ont observé une activation au niveau de la région du LOC (*Cf* PARTIE 1 Chapitre 1) chez les aveugles (mais également chez les voyants), indiquant que la reconnaissance tactile d'objets (en absence d'imagerie mentale visuelle) est suffisante pour induire une activation au niveau du LOC.

Par conséquent, ces résultats suggèrent que l'imagerie mentale visuelle n'est pas nécessaire pour l'activation des aires visuelles de reconnaissance des objets. La privation sensorielle telle que la cécité congénitale comme décrit précédemment engendre une compensation sur le plan comportemental de la modalité sensorielle déprivée, se traduisant par de meilleures performances, voir même une meilleure expertise dans les modalités sensorielles intactes. Cette plasticité a pu être observé sur le plan cérébral, à l'aide de technique d'imagerie il a été mis en évidence une réorganisation fonctionnelle du cortex permettant ces transformations de performances comportementales à la suite d'une lésion. Ceci a mis en avant une idée nouvelle, selon laquelle les aires sensorielles longtemps considérées comme dédiées à une seule modalité de manière figée, sont en réalité des aires multimodales, capables de prendre en charge des informations correspondants à différentes modalités sensorielles.

Il faut néanmoins spécifier que certaines études n'ont pas retrouvé de réorganisation corticale au niveau de V1 chez l'animal adulte à la suite d'une lésion de la rétine (Smirnakis *et al.*, 2005).

Par ailleurs, une autre pathologie, touchant le système visuel périphérique est l'amblyopie. De nombreuses études ont montré que dans l'enfance si un œil est défectueux alors l'acuité visuelle de cet œil ne se développe pas normalement et la vision binoculaire est détériorée, donnant naissance alors à une : amblyopie (Prusky et Douglas 2003).

Il peut s'agir chez l'enfant d'amblyopie « organique » ou de « déprivation » à la suite d'une cataracte congénitale, d'un strabisme ou d'une opacité cornéenne opérée, d'amblyopie « fonctionnelles » ou de suppression, consécutive à une anisométrie (différence de réfraction entre les deux yeux). Le cortex visuel ne recevant pas les informations nécessaires pour son développement se réorganise en fonction des informations sensorielles qu'il reçoit. Certaines études en IRMf ont également mis en évidence une réorganisation du système visuel dans les atteintes de l'œil telle que la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). La DMLA est la première cause de handicap visuel chez la personne de plus de 50 ans. Cette perte de vision résulte d'une perte des photorecepteurs au centre de la macula. Certains auteurs ont observé que les cartes rétinotopiques au niveau du cortex visuel primaire peuvent changer à la suite d'un trouble périphérique tel que celui de la DMLA. Les résultats obtenus à l'aide de nombreuses expériences ont supposé que le substrat anatomique responsable de ce

phénomène de réorganisation corticale, est à la fois au niveau et autour du cortex visuel primaire mis sous silence car privé de réception d'information (De Weerd, Gattass, Desimone, et Ungerleider, 1995). La carte rétinotopique de V1 est alors modifiée, avec des neurones au niveau de la région « déafférentée » privés d'information visuelle à la suite de la lésion périphérique, qui deviennent capables de répondre à des stimuli venant de la zone périphérique de la lésion rétinienne (Chino, Smith, Kass, Sasaki, et Cheng, 1995). Plus récemment Musel et *al.*, (2011) ont étudié les capacités de traitement des fréquences spatiales (BFS vs HFS) lors d'une tâche de catégorisation de scènes naturelles présentées en champ central chez 12 patients atteints de DMLA. Ils s'attendaient à un meilleur traitement de BFS que des HFS malgré l'atteinte du champ visuel central. Les résultats ont mis en évidence que les patients DMLA faisaient significativement plus d'erreurs et étaient plus lents pour catégoriser les scènes en HFS que les scènes en BFS, alors que les participants sains (appariés en âge) ne présentaient pas de différence de performances selon le type de scènes (HFS ou BFS). De plus, les patients atteints de DMLA obtenaient des performances similaires à celles obtenues par les participants sains pour catégoriser les scènes en BFS alors qu'ils obtenaient de bien moins bonnes performances (commettaient plus d'erreurs et obtenaient une vitesse de traitement ralentie par rapport aux participants sains) pour catégoriser les scènes en HFS. Ces résultats mettent en exergue un déficit spécifique pour le traitement des HFS lors d'une tâche de catégorisation de scènes naturelles filtrées en HFS ainsi qu'un traitement des BFS relativement préservé.

Nous venons de détailler les études menées sur la plasticité cérébrale à la suite d'une atteinte au niveau des yeux, voyons maintenant les effets d'une lésion au niveau du nerf optique telle que la névrite optique (NO) et les conséquences que cette pathologie du système visuel périphérique peut avoir au niveau de la réorganisation cérébrale.

2.1.2. Lésion du nerf optique et du chiasma optique

La Névrite Optique (NO) est une neuropathie optique inflammatoire (se traduisant par une inflammation du nerf optique), qui le plus souvent touche l'adulte jeune entre 20 et 40 ans. Selon les études, les femmes sont principalement atteintes (56 à 80 % des cas) et l'âge moyen varie de 24.6 à 34 ans (Deschamps et *al.*, 2002). Plus de 50 % des adultes souffrant de névrite optique idiopathique présenteront une sclérose en plaque (SEP) au cours des années suivantes. Plusieurs travaux menés en IRMf ont mis en évidence une diminution du

volume d'activation au niveau du cortex visuel primaire suite à un épisode de névrite optique, ceci lorsque l'œil affecté est stimulé (comparativement à des sujets contrôles et à l'œil sain). Cette observation peut s'expliquer en partie par une réduction de l'input neuronal (Toosy et *al.*, 2002 ; Levin et *al.*, 2006). Il existerait en outre une activation anormalement élevée des aires extra-occipitales au cours d'une stimulation de l'œil pathologique, traduisant l'existence d'une réorganisation corticale (Werring et *al.*, 2000 ; Toosy et *al.*, 2002 ; Toosy et *al.*, 2005 ; Levin et *al.*, 2006).

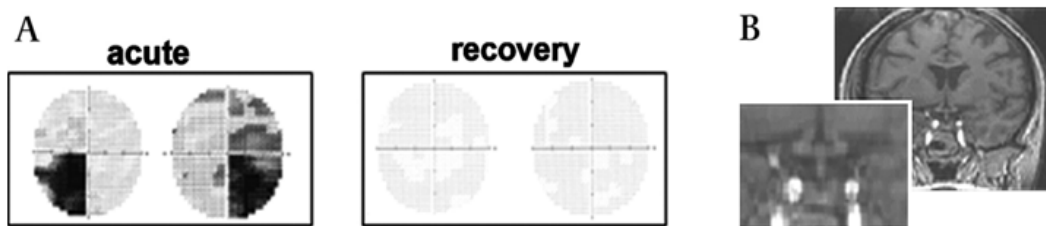


Figure 60 : A : Champs visuels durant la phase aiguë (à gauche) et après récupération (à droite) B : IRM anatomique, coupe coronale en T1 durant la phase aiguë (le chiasma optique est plus visible sur l'image du bas agrandie, et ne montre aucune anomalie). (Figures tirées de Raz et *al.*, 2010).

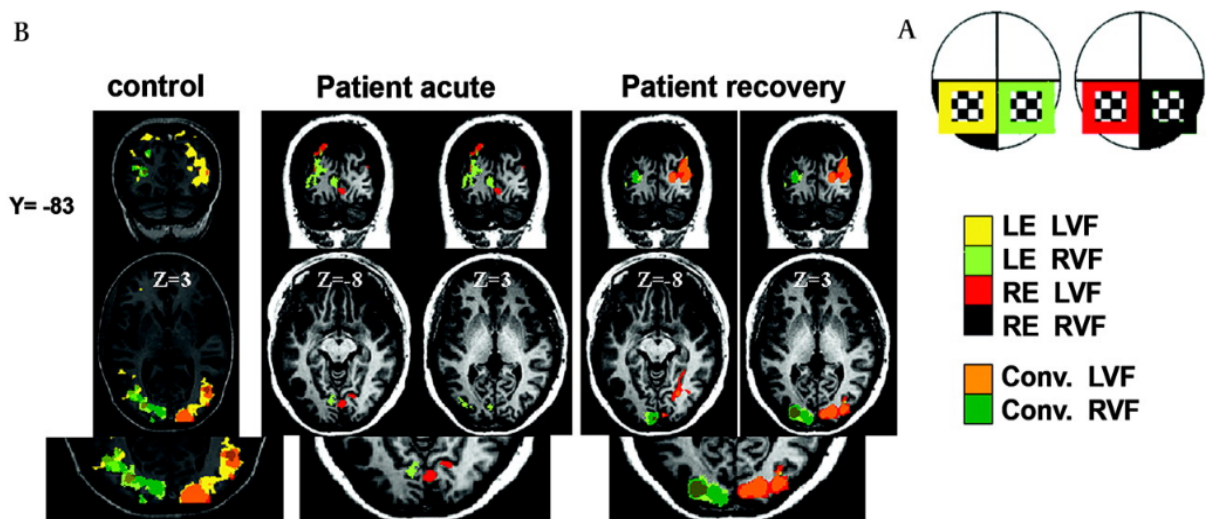


Figure 61 : (A) : Illustration du paradigme expérimental utilisé. Quatre conditions expérimentales : 1) : en jaune, les stimuli présentés à l'œil gauche dans le champ visuel gauche, 2) en vert les stimuli présentés dans le champ visuel droit de l'œil gauche, 3) en rouge stimuli présentés dans le champ visuel gauche de l'œil droit, 4) en noir stimuli présentés dans le champ visuel droit de l'œil droit. (B) Coupes coronales et axiales, des activations obtenues, durant les 4 conditions expérimentales. Activation au niveau des régions du cortex occipital chez un participant contrôle (à gauche) et pour un patient en phase aiguë (névrite optique) (au milieu) et après récupération (à droite). Conv. (convergence) pour les stimuli présentés aux deux yeux. (Figures tirées de Raz et *al.*, 2010).

Par ailleurs, l'étude menée par Langkilde et *al.* (2002) objective une corrélation entre le volume d'activation corticale dans les régions visuelle et les performances psychophysiques des patients (telles que la sensibilité au contraste et l'acuité visuelle), corroborant ainsi les données d'une précédente étude (Rombouts et *al.*, 1998). En outre, l'enregistrement de potentiels évoqués visuels (PEV) au cours d'études en IRMf met en évidence une corrélation entre la différence interoculaire au niveau des latences de PEV et la différence interoculaire au niveau de l'activation cérébrale (Russ, 2002). Une étude longitudinale en IRMf indique une réduction de l'activation au niveau du CGL, et du complexe occipital latéral, de V1 et V2, lorsque l'œil affecté est stimulé en phase aiguë. Cette différence d'activation entre les deux yeux diminue au cours de la période de récupération jusqu'à n'être plus significative 180 jours après le stade aigu (Korsholm et *al.*, 2007). Plus récemment, Raz et *al.* (2010) ont utilisé l'IRMf comme outil afin d'évaluer les conséquences d'une névrite chiasmatique, à la phase aiguë et récupérée, sur le fonctionnement cortical. Ils ont décrit le cas d'une patiente de 36 ans, qui présentait durant la phase aiguë une hémianopsie bi-temporale (Figure 60 (A)) (perte du champ visuel temporal au niveau des deux yeux à la suite d'une atteinte chiasmatique) plus prononcée au niveau du quadrant inférieur du champ visuel. Des hypersignaux de la substance blanche périventriculaire s'observaient à l'IRM anatomique, sans atteinte apparente du chiasma optique (Figure 60 (B)). Ils ont alors proposé à la patiente une tâche visuelle en IRMf, durant laquelle des damiers noirs et blancs s'inversant (donnant l'impression de clignoter) étaient présentés à chaque œil, au niveau du champ visuel inférieur (quadrant inférieur gauche ou droit pour chaque œil). (Figure 61 (A)). Cette tâche a été proposée à la patiente en phase aiguë et en phase récupérée (8 mois après, Figure 61 (B)). Ils ont pu alors observer que durant la phase aiguë de la névrite chiasmatique les aires visuelles corticales sont activées seulement de façon monoculaire (l'information transite par la voie ipsilatérale), alors que la récupération permet de nouveau une activation résultant de l'entrée binoculaire de l'information visuelle (l'information transite par la voie ipsilatérale et contralatérale *via* le chiasma). Ce résultat confirme l'association entre l'hémianopsie bi-temporale et le fonctionnement de la voie ipsilatérale projetant sur la voie rétinogéniculée (*Cf* PARTIE 1, chapitre1).

2.2. Plasticité cérébrale à la suite d'une lésion centrale du système visuel

Sortons du système visuel périphérique et abordons dès à présent, la question de la plasticité du système visuel à la suite d'une lésion cérébrale des aires visuelles.

2.2.1. Dynamique de la réorganisation après une lésion cérébrale

Comme évoqué précédemment, il existe des moments durant lesquels les circuits neuronaux ne sont pas figés, sont très maléables et présentent une grande sensibilité aux stimuli environnementaux, qui vont influencer leur organisation, c'est ce que l'on appelle période critique (Sale et *al.*, 2010). Durant ces périodes (différentes selon les modalités sensorielles) la maturation du cortex va être provoquée par une grande perte neuronale, due à la spécialisation des réseaux neuronaux surnuméraires, confrontés aux expériences sensorielles vécues par l'individu qui vont agir et structurer les circuits neuronaux. Cette plasticité neuronale est déjà présente à l'état embryonnaire et opère durant tout le développement de l'embryon. Elle est également présente après la naissance. La plasticité est réduite progressivement jusqu'à la fin de la période critique. Par la suite, les circuits neuronaux sont alors de moins en moins modifiables. La fin de la période critique est marquée par le développement des systèmes inhibiteurs GABAergiques qui se développent avant la fin de la période critique.

La lésion produit un déséquilibre entre les deux hémisphères et va engendrer alors une espèce de balance entre l'hémisphère sain et l'hémisphère lésé, la fonction touchée par la lésion basculerait vers l'hémisphère controlatéral. L'hémisphère sain va produire une forme d'inhibition sur l'hémisphère lésé, en effet on va observer une hyper activation de celui-ci et une hypo activation de l'hémisphère lésé. La fonction sous-tendue par l'hémisphère lésé va avoir tendance à passer dans l'hémisphère sain controlatéral. Ceci constitue en général une réorganisation maladaptative, et lorsque la fonction rebasculé dans l'hémisphère lésé alors il y a un rétablissement du déséquilibre de l'inhibition inter-hémisphérique engendré par la lésion, c'est alors les aires voisines à la lésion qui vont être recrutées, qui prennent le relais, et c'est dans ce cas de figure que la récupération du point de vue clinique, est en général la meilleure (Cardebat et *al.*, 2003).

De nombreuses études ont récemment montré que la plasticité du cortex visuel chez l'animal adulte lors de la récupération, est accompagnée d'une réduction de l'inhibition intra-corticale. C'est pourquoi Spolidoro et *al.*, (2009) ont proposé un modèle dans lequel la diminution de l'inhibition est le phénomène central déclenchant et générant la plasticité

au niveau du cortex visuel (chez l'animal adulte). Il y a une trentaine d'années, les observations physiologiques du cortex visuel primaire soutenaient l'hypothèse d'une absence de plasticité sensorielle chez les adultes. Pourtant il a été démontré que dans le cas d'une lésion du cortex visuel primaire, le patient souffrant d'une HLH peut, lors des semaines qui suivent la lésion, récupérer une partie de son champ visuel, mais cette récupération spontanée ne représente seulement que quelques degrés de récupération au niveau du champ visuel. La récupération spontanée semble être sous-tendue par un mécanisme neuronal, qui prend forme dans les semaines qui suivent la lésion, une réduction de l'inflammation autour du site lésionnel expliquerait ce phénomène. En effet la région péri-lésionnelle est mise sous silence à cause de l'effet de la lésion qui se propage. La région autour de la lésion qui était connectée à elle, ne l'est plus et ne reçoit plus d'informations, par conséquent elle est mise sous silence malgré le fait qu'elle ne soit pas détruite, il lui faut un certain temps pour retrouver une fonction active (Poggel, Kastan, Müller-Oehring, Sabel et Brandt, 2001). De plus il est très rare de voir une récupération spontanée du champ visuel deux ou trois mois après la lésion, cette observation clinique conforte l'idée que la plasticité spontanée a une contrainte temporelle (Zhang et *al.*, 2006b). En parallèle avec ce phénomène de réduction de l'inflammation peri-lésionnelle, une plasticité spontanée peut aussi être véhiculée à la suite d'une lésion de V1, grâce aux changements de propriétés des circuits neuronaux qui entourent la lésion (pour revue voir : Eysel, 1997). Les neurones dans cette zone péri-lésionnelle font preuve d'une importante plasticité, avec des changements au niveau de leur excitabilité et de leur taille de champ récepteur (Eysel et Schmidt-Kastner, 1991).

2.2.2. La réorganisation corticale 'maladaptative' à la suite d'une lésion centrale

A la suite d'une lésion la réorganisation corticale n'est pas toujours un processus qui engendre une amélioration de la fonction perdue ou la compensation de la fonction sensorielle déficitaire par d'autres préservées. En effet, dans le cas de la dystonie, appelée crampe de l'écrivain ou du violoniste, on observe chez les patients souffrant de cette pathologie une mauvaise réorganisation de l'aire corticale de la main qui conduit à une représentation confuse somatosensorielle des doigts (Elbert et *al.*, 1998), entraînant alors des troubles fonctionnels. La dystonie focale de la main est maintenant considérée comme

une conséquence d'une « mauvaise » réorganisation, d'une mauvaise plasticité en quelque sorte. Les patients souffrant de dystonie ont un niveau significativement réduit au niveau de l'inhibition véhiculée par les neurotransmetteurs : GABA au niveau du cortex sensorimoteur et du noyau lenticulaire controlatéral à la main atteinte (Levy et *al.*, 2002). Ceci engendre très souvent chez les musiciens l'obligation de cesser leur pratique. Cette « mauvaise réorganisation » a beaucoup été étudiée sur le plan sensorimoteur mais dans le domaine de la vision elle reste un sujet peu exploré. Depuis toujours, les patients souffrant de dégénérescence maculaire ou d'autres atteintes de la rétine, parviennent à combler leur scotome ou alors perçoivent des distorsions de l'environnement spatial (Burke, 1999). Nous avons pu voir précédemment que la réorganisation corticale permet dans certains cas de compenser les troubles de la perception. Cependant quelques fois, cette réorganisation, ne permet pas au patient de retrouver une perception « normale ». Dilks et *al.* (2007) ont abordé cette problématique de mal réorganisation à la fois d'un point de vue clinique : comportemental, mais aussi avec des données obtenues par IRMf. Ils ont présenté le cas d'un patient de 51 ans : B.L. ayant souffert d'un AVC six mois avant l'expérimentation, épargnant le cortex visuel primaire (V1) mais touchant les fibres amenant l'information au cortex visuel primaire inférieur droit (radiations optiques inférieures de l'hémisphère droit), engendrant une amputation du champ visuel supérieure gauche. Il est intéressant de préciser que dans ce cas les neurones au niveau de V1 sont alors privés d'informations visuelles (correspondant au quadrant supérieur gauche du champ visuel) même s'ils ne sont pas détruits, ils ne reçoivent pas la quantité d'information nécessaire, ils doivent donc survivre à ce manque d'information. Ce patient, 6 mois après son AVC, perçoit alors des distorsions visuelles lorsque les stimuli visuels sont présentés au niveau de son champ visuel inférieur gauche. En effet, les stimuli apparaissent alors allongés, déformés dans son quadrant supérieur gauche. Par exemple un cercle présenté dans le champ inférieur gauche est perçu en forme de cigare dans le champ supérieur (Figure 62). Ces auteurs ont proposé comme hypothèse explicative que la distorsion perceptive soit une conséquence de la réorganisation corticale : la région du cortex visuel primaire V1 représentant le champ visuel supérieur gauche, déafférentée, ne recevrait donc plus d'information du champ supérieur gauche. Ainsi les stimuli présentés dans le champ inférieur seraient perçus déformés au niveau du champ supérieur qui est aveugle. Les données obtenues à l'aide d'IRMf confirment ces résultats comportementaux. En effet, la région déafférentée de V1 (représentant le champ visuel supérieur gauche) devient capable alors de répondre aux

stimuli présentés dans le champ visuel inférieur gauche. C'est-à-dire que la région de V1 qui était dédiée au champ supérieur gauche, par manque de réception d'information visuelle suite à l'amputation du champ, traite les informations provenant du champ inférieur et engendre une perception visuelle erronée. Ces résultats soutiennent l'hypothèse d'une réorganisation corticale au niveau du système visuel chez l'humain adulte, et la première étude à établir un lien entre la perception visuelle et la réorganisation corticale fonctionnelle.

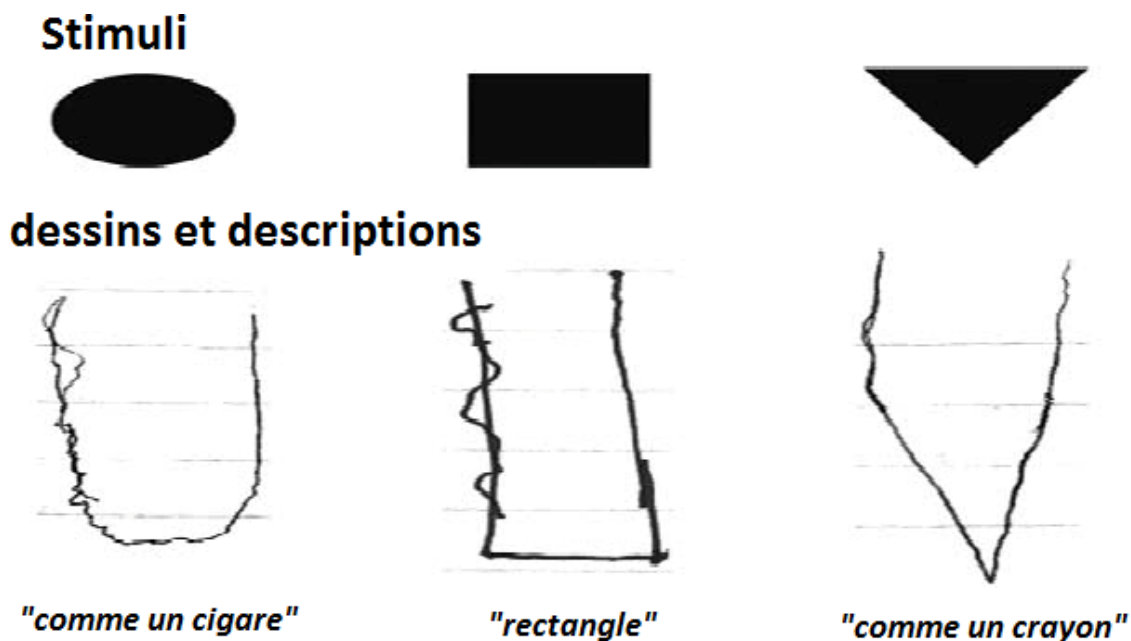


Figure 62 : En haut : Stimuli présentés dans le champ visuel amputé d'un patient souffrant d'une lésion du cortex visuel primaire droit. En bas : dessins réalisés par le patient pour imaginer la perception déformée des stimuli présentés dans son champ visuel amputé. (Figure tirée de Dilks et *al.*, 2007).

Après avoir exposé les processus de plasticité à la suite d'une atteinte du système visuel, nous présentons notre étude menée en IRMf dans le cadre d'une atteinte du système visuel central chez des patients HLH souffrant d'une lésion du cortex visuel primaire (rappel PARTIE 1 chapitre 3), dont les données comportementales sont présentées PARTIE 2 au chapitre 2. Nous exposerons tout d'abord les objectifs de notre étude puis notre protocole (qui est identique à celui utilisé lors de l'étude comportementale), et enfin les résultats obtenus.

CHAPITRE 2 : PHENOMENE DE REORGANISATION CEREBRALE APRES UNE LESION OCCIPITALE DROITE OU GAUCHE

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors d'une étude menée en IRMf, chez des patients souffrant d'hémianopsie latérale homonyme lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles en champ central. Nous présentons d'abord les résultats d'une étude préliminaire puis sous forme d'article [Article 3] les résultats de manière plus détaillée.

Nous avons utilisé la technique d'Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle (IRMf) dans le but de mettre en évidence les substrats neuronaux impliqués chez le sujet sain dans une tâche de reconnaissance de scènes naturelles avec une consigne verbale de détection ou de catégorisation, mais également afin de vérifier chez les patients HLH si la latéralisation de la lésion peut avoir un impact sur la réorganisation corticale, lors du traitement visuel en champ central.

En annexe 4 nous présentons la technique d'IRMf utilisée dans notre étude, que nous décrivons brièvement avec ses principes physiques et neurophysiologiques ainsi que la méthode de traitement et d'analyse utilisée pour les données acquises lors de cette étude.

I. Etude 4 préliminaire en IRMf : plasticité des aires visuelles cérébrales : effets de la latéralisation de la lésion et de la consigne

Le protocole expérimental de notre étude comportementale présenté lors de notre étude 2, a été adapté à la technique de l'IRMf afin d'identifier les substrats corticaux impliqués lors de la reconnaissance de scènes naturelles en champ central à la fois chez les participants contrôles et chez les patients souffrant d'hémianopsie latérale homonyme.

Plusieurs travaux ont montré qu'une lésion occipitale s'accompagnait d'une réorganisation corticale au sein de l'hémisphère lésé et/ou de l'hémisphère intact. Cependant, l'étude de

l'effet de la latéralisation de la lésion reste marginale. Ceci est d'autant plus surprenant qu'il a été montré chez le sujet sain que, même si elle est essentiellement visuelle (et favorise *à priori* l'hémisphère droit), la nature de la tâche pouvait faire apparaître une prédominance de l'hémisphère gauche. Les données de la littérature soulèvent la question d'interactions entre hémisphère lésé, tâche, et plasticité cérébrale. Pour tenter de répondre à ces interrogations, nous présentons ici les résultats préliminaires d'une étude IRMf des réseaux sous-tendants la reconnaissance de scènes naturelles présentées en champ central avec une consigne de détection et de catégorisation.

Chez le sujet sain, nous observons une activation bilatérale lors de la tâche avec la consigne de détection et une activation latéralisée dans l'hémisphère gauche lors de la tâche avec la consigne de catégorisation. Chez le patient cérébro-lésé droit l'activation est bilatérale quelle que soit la tâche demandée par la consigne. Chez le patient cérébro-lésé gauche on observe une activation essentiellement latéralisée à droite pour la tâche quelle que soit la consigne. Ces données montrent que la latéralisation d'une lésion occipitale n'est pas sans conséquence sur la nature de la réorganisation corticale qui s'ensuit.

1. Bref rappel

L'hémianopsie latérale homonyme (HLH), où l'amputation du champ visuel contralatéral à une lésion post-chiasmatique est identique pour les deux yeux (Perenin, 1992), est sans doute le déficit d'origine centrale le plus fréquent (Chokron, 2002), en particulier lors d'un accident vasculaire cérébral (Pambakian et *al.*, 2005, Chokron, 2002, Pambakian et Kennard, 1997). Selon Marshall et *al.*, 2010 ces troubles toucheraient plus de 15% des patients à la suite d'une lésion cérébrale d'origine vasculaire. Sur une cohorte de 101 patients hémianopsiques une récupération spontanée du champ visuel a été observée chez environ 38% des patients (Zhang et *al.*, 2006), le plus souvent dans les 3 mois qui suivent la lésion. Toutefois, cette récupération ne concerne qu'une faible proportion du champ visuel et sa probabilité d'occurrence diminue fortement au fur et à mesure que le délai depuis la lésion augmente (Zhang et *al.*, 2006). Par conséquent, l'HLH est le plus souvent considérée comme un trouble visuel primaire irréversible. Cependant, des travaux récents suggèrent qu'une récupération du champ visuel reste possible au-delà de 3 mois après l'installation de la lésion à condition de procéder à un entraînement approprié (Chokron et *al.*, 2008). Nous discutons ci-dessous quelques études portant sur les phénomènes de

réorganisation corticale après une lésion post-chiasmatique et présentons des données originales sur l'interaction complexe entre localisation lésionnelle, activation cérébrale et nature de la tâche visuelle à réaliser (induite par la consigne verbale).

1.2. La réorganisation corticale dans la HLH

Chez le sujet sain, l'information visuelle issue de la rétine est relayée par une structure thalamique, le Corps Genouillé Latéral (CGL). Du fait de la décussation partielle au niveau du chiasma optique, chaque CGL relaie les informations issues du champ visuel controlatéral. La principale voie visuelle relie ensuite le CGL à l'aire visuelle primaire (V1), puis aux aires visuelles extra-striées. Une seconde voie, elle aussi issue du CGL, court-circuite V1 pour relier directement le CGL à l'aire MT+/V5 (Sincich, 2004). Dans l'ensemble, et de façon très schématique, une stimulation visuelle présentée dans le champ visuel gauche (*vs.* droit) va donc s'accompagner d'une activation du CGL, de V1 et de MT+/V5 de l'hémisphère controlatéral, droit (*vs.* gauche).

Chez le patient hémianopsique, la plupart des travaux en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) ont montré qu'en présence d'une lésion occipitale unilatérale, une stimulation visuelle dans le champ visuel aveugle s'accompagnait non pas d'une activation controlatérale, mais d'une activation ipsilatérale des aires striées pouvant s'étendre aux aires extra-striées (Nelles et *al.*, 2007), et à V5/MT+ en particulier (Henriksson et *al.*, 2007). Par conséquent, le lobe occipital intact, qui traite les informations controlatérales, devient capable de traiter les informations ipsilatérales (*i.e.*, issues du champ visuel dégradé). Néanmoins, d'autres travaux suggèrent qu'une activation de l'hémisphère lésé reste possible lors d'une stimulation visuelle controlésionnelle (Nelles et *al.*, 2007). Par exemple, une activation périlésionnelle a été observée lors d'une stimulation dans le champ visuel aveugle de patients hémianopsiques (Pleger et *al.*, 2003).

Dans l'ensemble, les données de la littérature suggèrent donc que les informations visuelles issues du champ visuel aveugle sont prises en charge soit par les deux hémisphères, soit par l'hémisphère ipsilatéral. Plusieurs travaux utilisant la Stimulation Magnétique Trans-crânienne (TMS) ou l'imagerie par Tenseur de Diffusion (DTI) laissent supposer que cette redistribution de l'activation cérébrale serait sous-tendue, entre autres, par une réorganisation des connexions inter-hémisphériques. Plus particulièrement, les

patients semblent disposer d'un faisceau de fibres reliant le CGL de l'hémisphère lésé à l'aire MT+/V5 de l'hémisphère sain, *via* le splénium (Bridge et *al.*, 2008), ainsi qu'une voie reliant les aires MT+/V5 droite et gauche *via* le corps calleux (Bridge et *al.*, 2008). Les travaux utilisant la TMS suggèrent quant à eux que la connexion entre le CGL de l'hémisphère sain et l'aire MT+/V5 de l'hémisphère lésé est fonctionnelle bien qu'une activation bilatérale des aires V5 semble nécessaire pour un traitement visuel « élaboré » (Silvanto et *al.*, 2007). Considérées dans leur ensemble, ces données suggèrent qu'une connexion calleuse hyper-développée (entre CGL et MT+/V5 et/ou entre les aires MT+/V5) contribuerait à la redistribution de l'activité cérébrale et expliquerait que l'hémisphère sain devienne capable de traiter les informations visuelles issues du champ visuel ipsilatéral (controlésionnel).

1.3. Traitement visuo-spatial, spécificité de la tâche, et asymétrie hémisphérique

Le plus souvent, le traitement de l'information visuelle est étudié à l'aide soit de tâches de détection de stimuli (i.e., indiquer la présence d'un stimulus), soit de tâches de catégorisation de stimuli (i.e., identifier un stimulus). Bien que quelques auteurs (Grill Spector et *al.*, 2005) aient suggéré que la détection et la catégorisation soient sous-tendues par un processus commun indissociable (i.e., dès l'instant où l'image est détectée elle est aussitôt catégorisée), de plus en plus de données laissent à penser que deux mécanismes distincts sous-tendent ces deux fonctions. Par exemple, utiliser des stimuli variés [e.g., en variant l'orientation de l'objet présenté (haut/bas)] ne fait pas varier le temps de la détection ; en revanche cela rend la catégorisation beaucoup plus difficile. Par conséquent, la détection d'un objet ne semble pas impliquer nécessairement son identification (Mack et *al.*, 2008).

De plus, la spécialisation hémisphérique ne semble pas être la même dans les tâches de détection et de catégorisation. Schématiquement, chez l'adulte droitier sain, l'hémisphère gauche est prédominant pour les activités de nature langagière, et l'hémisphère droit est plus spécialisé pour le traitement visuo-spatial. Ainsi, des tâches de détection visuelle de stimuli simples permettent de montrer une prédominance de l'hémisphère droit. En revanche, et malgré la nature visuelle de la tâche de catégorisation de stimuli visuels, les

données de la littérature suggèrent une asymétrie fonctionnelle en faveur de l'hémisphère gauche dans ce type de tâche (Kitterle et *al.*, 1992).

Les réseaux cérébraux sous-tendants les capacités de détection et de catégorisation de scènes naturelles dans le champ central ont été étudiés à l'aide d'une procédure IRMf chez des sujets sains, des patients hémianopsiques droit (HLHd/lésion gauche) et gauche (HLHg/lésion droite).

2. Etude préliminaire

Cette étude est menée chez 1 participant contrôle, 1 patient HLHg et 1 patient HLHd. Elle a ensuite été poursuivie sur un échantillon plus important. Les résultats obtenus lors de cette étude plus approfondie sont présentés sous forme d'article [Article 3].

2.1. Méthode

2.1.1. Participants

Trois hommes, droitiers et avec une acuité visuelle normale, corrigée ou non, ont été recrutés. Le participant témoin, âgé de 58 ans, n'avait pas d'antécédents neurologiques, psychiatriques ou médicaux. Le patient HLHg, âgé de 70 ans, et le patient HLHd, âgé de 57 ans, avaient une sensibilité au contraste normale (test du Pelli-robson), une hémianopsie objectivée à l'aide d'une périmétrie automatisée, et ne présentaient pas de trouble neuropsychologique (trouble de la mémoire) ou visuo-spatial (négligence ou agnosie) associé (vérifié à l'aide d'un bilan neurovisuel et du Mini Mental State Evaluation). Ces deux patients présentaient une lésion occipitale quasi identique touchant les aires 17-18-19 de Brodmann ; le volume de la lésion du patient HLHd (lésion gauche) était de 17.8cm³ et de 11.47cm³ pour le patient HLHg (lésion droite) (Figure 63).

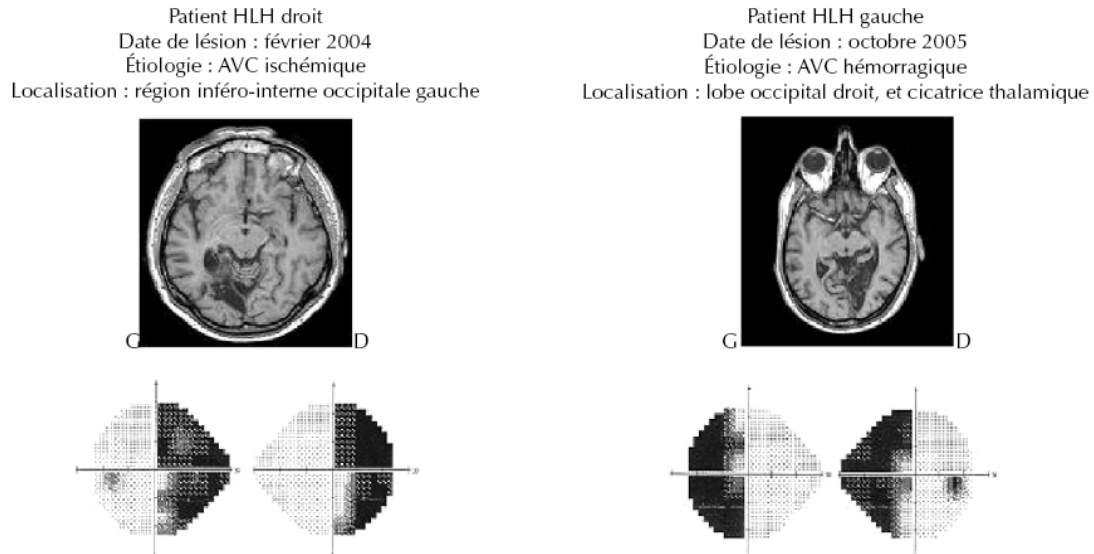


Figure 63 : Examen IRM révélant la localisation de la lésion et examen du champ visuel (examen périmétrique automatique Humphreys, programme SITA FAST 24-2) des deux patients hémianopsiques (HLH) inclus dans l'étude.

2.1.2 Protocole expérimental (Figure 65)

Dix stimuli visuels différents (256x256 pixels, 128 niveaux de gris) constitués de 6 photographies de villes, 2 photographies d'autoroutes, et 2 images grises ont été utilisés dans une tâche. Soit la consigne verbale de détection était donnée (« y a t'il une image présente à l'écran ? ») et soit de catégorisation (« y a-t-il une image de ville ou d'autoroute à l'écran ? »). Toutes les images étaient entourées d'un cadre noir, avaient une taille de 4° d'angle visuel, et leur ordre de présentation était randomisé par bloc de 10 (Figure 64). Un essai débutait par l'apparition d'une croix de fixation centrale (400ms), puis le stimulus était présenté pendant 100ms, et enfin un écran était affiché pendant 1500ms pour que le participant donne sa réponse à l'aide d'un boîtier (Figure 65).



Figure 64 : Exemple de stimuli utilisés dans la tâche avec consigne soit de détection soit de catégorisation de scènes naturelles (de gauche à droite : image de ville, image d'autoroute, et stimulus nul).

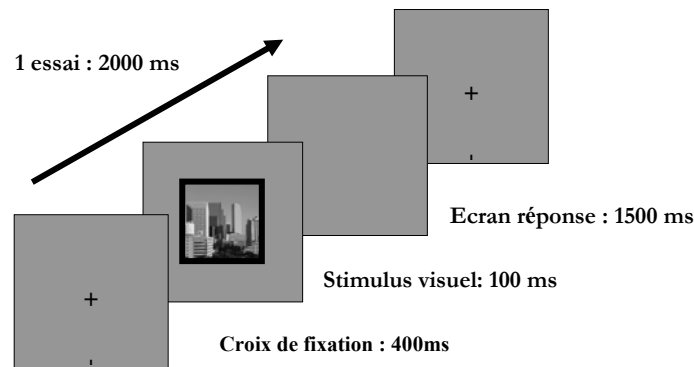


Figure 65 : Exemple de stimuli utilisés dans la tâche avec une consigne soit de détection soit de catégorisation de scènes naturelles (de gauche à droite : image de ville, image d'autoroute, et stimulus nul) ; B) Décours d'un essai : un essai commence par une croix de fixation centrale pendant 400 ms suivie par un stimulus apparaissant 100 ms au centre de l'écran. Les participants ont un délai de réponse fixe de 1 500 ms (intervalle inter-stimulus).

Un essai commence par une croix de fixation centrale pendant 400ms suivie par un stimulus apparaissant 100ms au centre de l'écran. Les participants ont un délai de réponse fixe de 1500ms (intervalle inter-stimulus). La tâche comprend 24 blocs de 10 essais, c'est-à-dire un bloc est répété 8 fois au lieu de 4 fois. Ainsi l'expérience entière est composée de 48 blocs, ce qui représente 480 essais. La tâche pour chaque consigne (détection vs catégorisation) comprend 4 groupes de 6 blocs qui sont alternés (Figure 66).

	Detection						Instruct	Categorization						Pause
RUN 1	HF	BF	NF	HF	NF	BF	1	NF	HF	BF	NF	BF	HF	
	Categorization							Detection						
RUN 2	BF	NF	HF	BF	HF	NF	2	HF	BF	NF	HF	NF	BF	
	Detection							Categorization						
RUN 3	NF	HF	BF	NF	BF	HF	3	BF	NF	HF	BF	HF	NF	
	Categorization							Detection						
RUN 4	HF	BF	NF	HF	NF	BF	4	NF	HF	BF	NF	BF	HF	

Figure 66 : Illustration du paradigme en bloc utilisé pour notre étude, avec les quatre sessions, la session 1 (run1) commence par la consigne de détection puis après un temps de pause durant lequel la nouvelle consigne est donnée, la consigne de catégorisation suit, puis la session 2 : catégorisation/détection la session 3 : détection / catégorisation, session 4 : catégorisation / détection. A l'intérieur de session, et chaque consigne 6 blocs s'alternent, avec une dominance de chaque fréquence pour chacun des blocs : HFS : dominance de scènes en hautes fréquences spatiales, BFS : dominance de scènes en basses fréquences spatiales, et NF : scènes non filtrées.

2.1.3. Procédure IRMf (Cf Annexe 4)

Les stimuli, rendus visibles grâce à un jeu de miroirs, sont projetés, à l'aide d'un vidéo projecteur, sur un écran installé dans la salle d'imagerie (Figure 67). Le bloc de 10 stimuli était répété 6 fois pour chaque consigne, et les deux consignes étaient données successivement à l'intérieur d'une session. Les participants ont réalisé 4 sessions d'imagerie fonctionnelle, soit un total de 24 blocs ou encore de 240 essais par consigne. Des pauses (de 12 secondes) étaient réalisées entre chaque bloc (de 20 secondes) et entre les 2 consignes à l'intérieur de la session.



Figure 67 : Illustration du dispositif expérimental utilisé. Les stimuli, sont rendus visibles grâce à un jeu de miroirs. Ils sont projetés, à l'aide d'un vidéo projecteur, sur un écran installé dans la salle d'imagerie. Les images ont été acquises au moyen d'un imageur clinique Philips ACS-NT 1,5 T, en *echo planar (EPI)*, d'un volume fonctionnel composé de 33 coupes axiales séquentielles (3,6mm d'épaisseur). Les images fonctionnelles ont été acquises par bloc en T2* (Temps de répétition = 2909ms ; temps d'écho = 50ms ; matrice d'acquisition et de reconstruction : 64*64 pixels ; *Field-Of-View* = 240*240mm ; flip angle = 90° ; taille des voxels : 3,75 mm).

2.2. Traitement des images

L'analyse des images a été réalisée selon le modèle linéaire général (Friston et *al.*, 1995) à l'aide du logiciel statistique SPM5 (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK) requérant le logiciel Matlab (The Math Works Inc.TM, version 6.5). Les régions cérébrales activées ont été répertoriées à l'aide de l'atlas de Talairach et Tournoux (1988) chez le participant contrôle, mais chez les patients elles ont été identifiées au niveau individuel par le neuro-radiologue en charge de la procédure IRMf (Dr Savatovsky J.).

3. Résultats

Seuls les résultats des contrastes tâche (réalisée avec 2 consignes) versus repos, au seuil $p < .05$ corrigé, sont présentés ci-dessous.

3.1. Le participant contrôle (Table 3, et Figure 68)

Pour la tâche avec la consigne de détection, une activation bilatérale est observée au niveau du gyrus occipital (aire de Broadmann [AB] 18/19), du gyrus temporal interne, du gyrus fusiforme (AB37) et du gyrus supra marginal (AB40). En revanche, la tâche avec la consigne de catégorisation s'accompagne d'une activation du cortex occipital extra-strié gauche (AB19). De plus, les aires motrices primaires (AB4), le cortex somatosensoriel (AB3), et la jonction occipito-temporo-pariétale, gauches étaient activés pour les deux consignes.

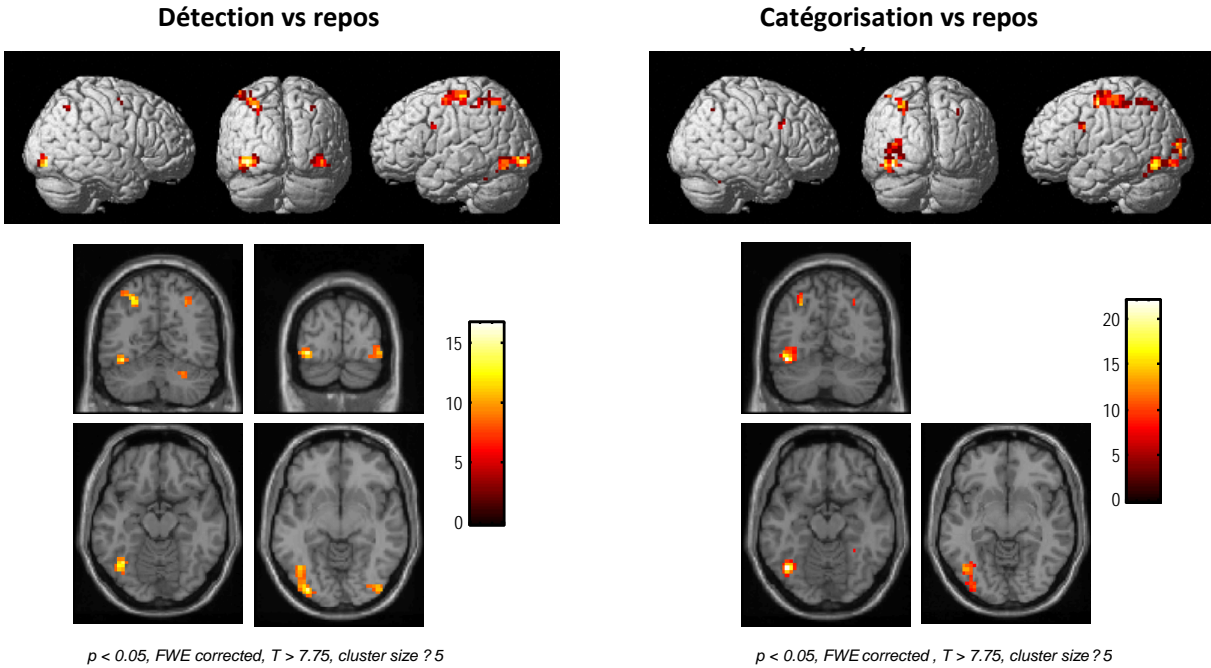


Figure 68 : Activation obtenue lors de la tâche avec la consigne de détection (à gauche) et de catégorisation (à droite) par les 14 participants contrôles.

Table 3 Régions cérébrales actives chez les contrôles durant (a) avec la consigne de détection et (b) avec la consigne de catégorisation. Pour chaque cluster, les valeurs maximales de t sont présentées en premier suivies des régions appartenant à d'autres clusters [entre parenthèses]. Les coordonnées de Talairach (x,y,z), les aires de Brodmann (AB), et le nombre de voxels dans le cluster (k) sont indiqués.

Contraste	Régions	côté	AB	k	x	y	z	T
<i>(a) Consigne de détection</i>								
[detection > repos]	Lobule pariétal supérieur/précunéus	G	7	79	-26	-52	49	16.66
	[lobule pariétal inférieur]		40		-33	-45	42	9.88
	Gyrus occipital inférieur	G	18	92	-34	-86	-2	14.45
	[gyrus occipital médian]		19		-41	-66	-6	13.57

[gyrus temporal inférieur/gyrus fusiforme]			37		-37	-59	-9	13.41
Gyrus précentralPrecentral gyrus	G	4/6	57		-45	-8	53	11.15
Gyrus occipital inférieur	D	18	26		41	-84	-2	10.75
Lobule pariétal supérieur	D	7	7		30	-56	46	9.49
Cervelet	D	-	15		26	-59	-21	9.19
Gyrus frontal inférieur	G	9	5		-52	9	26	8.89
Gyrus frontal median	D	6	9		30	-5	50	8.84
Gyrus frontal median	G	6	7		-26	-5	53	8.43

(b) Consigne de catégorisation

[catégorisation > repos]	Gyrus temporal inférieur/Fusiforme	G	37	82	-41	-62	-9	21.99
	[Gyrus occipital inférieur]		18		-33	-84	-2	10.65
	Lobule pariétal supérieur/précunéus	G	7	45	-26	-52	52	14.13
	Gyrus frontal supérieur	G	6	11	-4	10	49	11.28
	Gyrus précentral	G	4/6	10 6	-41	-8	53	10.76
	Gyrus occipital moyen	G	19	31	-33	-87	14	10.16
			18		-30	-91	5	8.65
	Gyrus frontal inférieur	G	9	8	-56	9	26	9.60
	Gyrus frontal inférieur	D	9	10	41	9	26	9.32
	Cervelet	D	-	13	30	-48	-22	8.78

Abréviations : D = hémisphère droit ; G = hémisphère gauche.

3.2. Le patient HLH droit (cérébro-lésé gauche) (Figure 69)

La tâche réalisée avec la consigne de détection met en évidence une activation bilatérale (plus intense à droite) de la région occipitale inférieure latérale (AB 18). Dans l'hémisphère droit, cette activité s'étend à la partie supérieure de AB 18 et à la partie interne de AB 19. Lorsque la tâche est réalisée avec la consigne de catégorisation, une augmentation du signal est observée dans l'aire AB 18 dans l'hémisphère droit principalement. En dehors des aires motrices qui sont activées dans les deux cas (non détaillé ici), la tâche réalisée avec les deux consignes s'accompagne essentiellement d'une activation de l'hémisphère droit.

Détection vs repos



Catégorisation vs repos



P < .05 FWE corrected, 5 voxels, T > 4.70 P < .05 FWE corrected, 5 voxels, T > 4.70

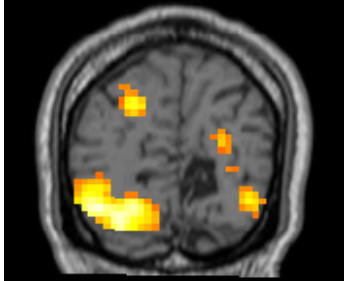
Figure 69 : Activation observée chez le patient hemianopsique droit (lésion gauche) avec la consigne de détection (figure de gauche) et de catégorisation (figure de droite).

3.3. Le patient HLH gauche (cérébro-lésé droit) (Figure 70)

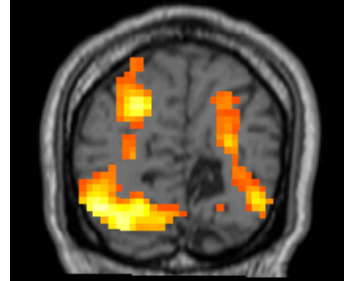
Lors de la tâche avec la consigne de détection, une activation est observée dans les aires extra-striées (AB 18 et 19), dans le cortex cingulaire (AB 30, bilatéral), le gyrus fusiforme (AB 37), et le gyrus supramarginal (AB 40, bilatéral). Lors de la catégorisation, il existe une activation unilatérale (gauche) des aires striées (AB 17) et une activation bilatérale des aires extra-striées (AB 18 et 19). Ceci s'accompagne d'une augmentation d'activité dans le gyrus supramarginal (AB 40) gauche. Enfin, une activité dans les aires somatosensorielles (AB 5 gauche et AB 7 bilatéral) et les aires motrices est aussi observée dans les deux cas.

Dans l'ensemble, le patient HLHg (lésion droite) montre une activation essentiellement bilatérale quelle que soit la consigne donnée (c'est-à-dire quelle que soit la tâche qu'il réalise).

Détection vs. Repos



Catégorisation vs repos



P<.0001 FWE corrected, 5 voxels, T> 5.90 / P<.0001 FWE corrected, 5 voxels, T> 5.90

Figure 70 : Activation observée chez le patient hemianopsique gauche (lésion droite) pour la consigne de détection (figure de gauche) et de catégorisation (figure de droite).

Les résultats obtenus lors de cette étude préliminaire vont dans le sens de notre hypothèse, selon laquelle on s'attend à un effet de la latéralisation de la lésion occipitale. Cependant, ces résultats s'appuient sur un échantillon trop peu important, c'est pourquoi nous avons complété cette étude. Les résultats de celle-ci sont présentés ci-après sous forme d'article (article 3), de manière plus détaillée chez 14 participants contrôles, 3 patients HLHd, cérébro-lésés gauche, et 5 patients HLHg, cérébro-lésés droit. Les données cliniques de ces patients sont présentées Table 1 et Figure 1 de l'article, les stimuli et le paradigme expérimental Figure 2, les résultats comportementaux obtenus sont présentés Figure 3, les activations observées chez les contrôles et chez les patients sont illustrées Figures 4 et 5. Les résultats obtenus à l'aide de cet échantillon plus large, vont dans le même sens que ceux observés et décrits précédemment chez 1 patient HLHd (cérébro-lésé gauche) et 1 HLHg (cérébro-lésé droit) et 1 témoin.

Article 3

Brain Topogr
DOI 10.1007/s10548-012-0244-z

ORIGINAL PAPER

An fMRI Investigation of the Cortical Network Underlying Detection and Categorization Abilities in Hemianopic Patients

Céline Perez · Carole Peyrin · Céline Cavézian · Olivier Coubard ·
Florent Caetta · Noa Raz · Netta Levin · Gaëlle Doucet · Frédéric Andersson ·
Michaël Obadia · Olivier Gout · Françoise Héran · Julien Savatovsky ·
Sylvie Chokron

Received: 3 December 2011 / Accepted: 21 July 2012
© Springer Science+Business Media, LLC 2012

Abstract The current study aims to investigate visual scene perception and its neuro-anatomical correlates for stimuli presented in the central visual field of patients with homonymous hemianopia, and thereby to assess the effect of a right or a left occipital lesion on brain reorganization. Fourteen healthy participants, three left brain damaged (LBD) patients with right homonymous hemianopia and five right brain damaged (RBD) patients with left homonymous hemianopia performed a visual detection task (i.e. “Is there an image on the screen?”) and a categorization task (i.e. “Is it an image of a highway or a city?”) during a block-designed functional magnetic resonance imaging recording session. Cerebral activity analyses of the posterior areas—the occipital lobe in particular—highlighted bi-hemispheric activation during the detection task but more lateralized, left

occipital lobe activation during the categorization task in healthy participants. Conversely, in patients, the same network of activity was observed in both tasks. However, LBD patients showed a predominant activation in their right hemisphere (occipital lobe and posterior temporal areas) whereas RBD patients showed a more bilateral activation (in the occipital lobes). Overall, our preliminary findings suggest a specific pattern of cerebral activation depending on the task instruction in healthy participants and cerebral reorganization of the posterior areas following brain injury in hemianopic patients which could depend upon the side of the occipital lesion.

Keywords Hemianopia · Detection · Categorization · Natural scenes · fMRI

C. Perez · C. Peyrin
Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition,
UMR 5105 CNRS- UPMF, Grenoble, France

C. Perez · C. Cavézian · F. Caetta · S. Chokron (✉)
Unité Fonctionnelle Vision & Cognition, Fondation
Ophtalmologique Rothschild, 25, rue Manin, 75019 Paris,
France
e-mail: schokron@fo-rothschild.fr

C. Cavézian · F. Caetta · S. Chokron
Laboratoire de Psychologie de la Perception, UMR 8156 CNRS
& Université Paris V, Paris, France

O. Coubard
The Neuropsychological Laboratory, CNS-Fed, Paris, France

N. Raz · N. Levin
Department of Neurology, Hadassah Hebrew-University
Hospital, Jerusalem, Israel

G. Doucet
Departments of Neurology and Neurosurgery, Cognitive
Neuroscience and Brain Imaging Laboratory, Thomas Jefferson
University, Jefferson Medical College, Philadelphia, PA, USA

F. Andersson
Université F. Rabelais Tours, IFR 135, 10 Bd Tonnellé,
37032 Tours Cedex 1, France

M. Obadia · O. Gout
Service de Neurologie, Fondation Ophtalmologique Rothschild,
Paris, France

F. Héran · J. Savatovsky
Service de neuroradiologie, Fondation Ophtalmologique
Rothschild, Paris, France

Published online: 10 August 2012

 Springer

Introduction

Numerous behavioural and imaging studies with both healthy individuals and brain-damaged patients have shown that the brain's functional asymmetry for visuo-spatial functions is a subtle phenomenon sensitive to a wide range of factors either experimental or related to the stimulus properties (e.g., time, location, spatial frequency content; Oliva and Schyns 1997; Peyrin et al. 2006b). Several functional asymmetries for visuo-spatial processing are well-known such as the left hemisphere predominance for local information or high spatial frequency content, or the right hemisphere predominance for global information or low spatial frequency content (Kitterle et al. 1990; Lux et al. 2004; Sergent 1982; Wilkinson et al. 2001). However, little is known about the influence of cognitive demand on the functional asymmetry for visuo-spatial processing. In the same vein, although hemispheric asymmetries for visual processing have been extensively studied in associative cortices, such as the temporo-parietal region (Han et al. 2002; Robertson and Delis 1986), less research has focused on asymmetries regarding the occipital cortex. This may be due to the classic assumption of a lack of such an early hemispheric asymmetry. Yet, few studies have verified that "a priori" assumption. For example, imaging studies in healthy participants showed a differential implication of the right and the left occipital lobe depending on the visual characteristics to process (e.g., low or high spatial frequency, global or local information; Fink et al. 1996; Han et al. 2002).

One way to tackle the question of a hemispheric specialization at the occipital level is to study unilateral occipital damage patients with subsequent homonymous hemianopia, which is a loss of vision in the contralesional visual field. Recent data suggest that vision in the central and the ipsilesional visual field, although previously considered as normal, could be altered as well (Paramei and Sabel 2008; Rizzo and Robin 1996; Schadow et al. 2009). In addition, recent behavioural data in left and right hemianopic patients suggest that the lesion side may indeed qualitatively and quantitatively determine the visual processing deficit even in the central visual field (Cavézian et al. 2010; Peyrin et al. 2006a).

The goals of the present study are threefold. First, visual processing in the central visual field and its underlying neural correlates were assessed in hemianopia. Second, we aimed to test for the effect of the lesion side on the performance as well as on the cerebral activation pattern, especially in the occipital lobe, when processing information in the central visual field. Finally, we investigated functional neural correlates according to the cognitive demand of the task (low in the detection task or high in the categorization task). For these purposes, we included healthy participants as well as right and left occipital damaged patients (with left or right

hemianopia respectively), and asked them to complete detection and categorization tasks of natural scene images presented in the central visual field while behavioural performance and brain activity were recorded under functional magnetic resonance imaging (fMRI). Given that our previous studies in normal and brain-damaged patients were consistent with an hemispheric specialization for spatial frequency processing (Cavézian et al. 2010; Coubard et al. 2011; Grabowska and Nowicka 1996; Han et al. 2002; Kitterle et al. 1990; Peyrin et al. 2003), we submitted left and right brain-damaged patients (LBD and RBD) as well as healthy participants to visual detection and categorization tasks using non filtered as well as filtered pictures (for low or high spatial frequencies). Acting as a basic visuospatial task, simple detection may preferentially engage the right hemisphere, whereas the categorization task may also recruit the left hemisphere (e.g., Grabowska and Nowicka 1996). Thus, we expected a predominant right hemispheric occipital activation in the detection task for healthy participants and, in consequence, for RBD patients to be specifically impaired in the detection task. In contrast, due to the specialization of the left inferior occipito-temporal cortex in the categorization of natural scenes (Peyrin et al. 2010), we expected a predominant left hemisphere occipital activation in the categorization task for healthy participants and, for this reason, we expected LBD patients categorization task. In addition, regarding hemispheric specialization for spatial frequency processing, the performance of LBD and RBD patients could be a function not only of the task but also on the spatial frequency content of the picture. Importantly, for both the detection and the categorization tasks, we strictly used the same paradigm (same stimuli, order and time of presentation, response) but only the instructions differed (detect or categorize). This procedure allows for specific examination of the influence of low and high top-down demands on visual processing (in posterior areas) in healthy participants as well as after a posterior damage. Overall, this study may provide new insights about the functional role of each occipital lobe in central vision according to top-down visual demand, while improving our knowledge about cerebral reorganization induced by a left or a right occipital lesion.

Method

Participants

Fourteen healthy male volunteers (mean age \pm SD, [age range] = 55.01 ± 11.44 years, [34–79.5]) and 8 hemianopic male patients (5 RBD, 57.50 ± 12.67 years, [43–71.05]; 3 LBD, 58.34 ± 11.01 years, [48.13–70]) participated in this study. Detailed clinical data are presented in Table 1 and Fig. 1. All participants were right-handed as assessed by the

Table 1 Patients clinical details

Patient	Age (years)	Etiology	Time interval from lesion (months)	Volume of lesion (cm ³)	Lesion site—Brodmann area	Pelli-Robson score
RHH1	56.9	Ischemia	36	17.80	17–18–19	1.95
RHH2	69.9	Haemorrhage	30.4	54.20	17–18–19–39–21–37	1.95
RHH3	48.1	Ischemia	10	0.93	17	1.95
LHH1	55.3	Haemorrhage	33	8.80	18–19	1.95
LHH2	71	Ischemia	21.2	14.22	17–18	1.8
LHH3	70	Ischemia	34	11.47	17–18–19	1.95
LHH4	43	Haemorrhage	22	18.30	19–20–21–37	1.95
LHH5	48.2	Ischemia	25	1.21	17	1.95

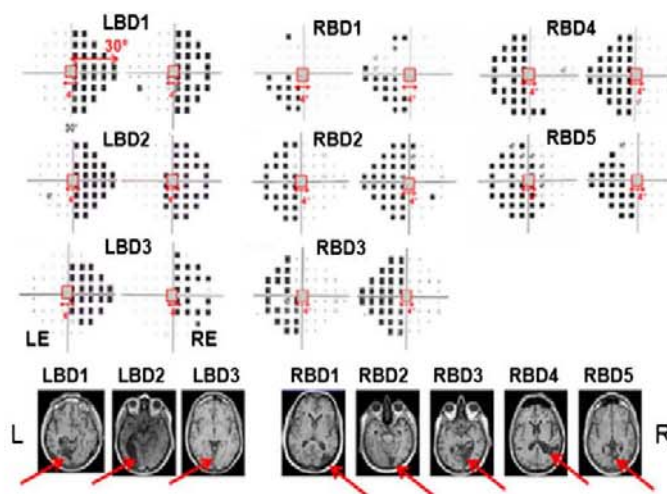


Fig. 1 Anatomic MRI and visual perimetry (Humphreys SITA-FAST 24-2 extending to 30° around the central fixation point) of each patient with homonymous hemianopia (from left to right: LBD1, LBD2, LBD3, RBD1, RBD2, RBD3, RBD4 and RBD5). The small red square within each visual field perimetry illustrates the location of

the stimulus in the visual field (but note that the experiment was run binocularly). MR images are presented in the neurological convention where the right hemisphere is on the right side (R) and the left hemisphere (L) on the left side. The red arrow indicates the lesion site. LE left eye, RE right eye (Color figure online)

Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield 1971), and had normal or corrected to normal visual acuity. They gave their informed consent to participate in the study. Patients and controls did not differ in age ($p = 0.86$). Our study was restricted to male participants in order to avoid sex differences in functional hemispheric asymmetries (for a meta-analysis about gender differences in hemispheric specialization, see Voyer 1996).

Materials and Method

Stimuli and Procedure

Stimuli were 8 black-and-white photographs (256×256 pixels) of natural scenes (6 cities and 2 highways, mean luminance of 122 and 123, respectively, on a 256 gray-level

scale) selected from a scene picture database (<http://cvcl.mit.edu/database.htm>). Stimuli were surrounded by a black frame. A grey image (128 grey-level scale) surrounded by a black frame was used as a null image stimulus. Angular size of all stimuli was fixed at 4° of visual angle. In order to increase hemispheric asymmetry for visuo-spatial processing (and in particular left hemisphere contribution), we decided to use filtered images. From each natural scene image, two additional stimuli were created—a LSF and an HSF filtered scene images (see Fig. 2a for examples). SF content of scenes was filtered by multiplying the Fourier transform of original images by Gaussian filters. The standard deviation of the Gaussian filter is a function of the SF cut-off, for a standard attenuation of 3 dB. We removed the SF content above 4 cycles per degree of visual angle (i.e. low-pass cut-off of 16 cycles per image) for LSF scene

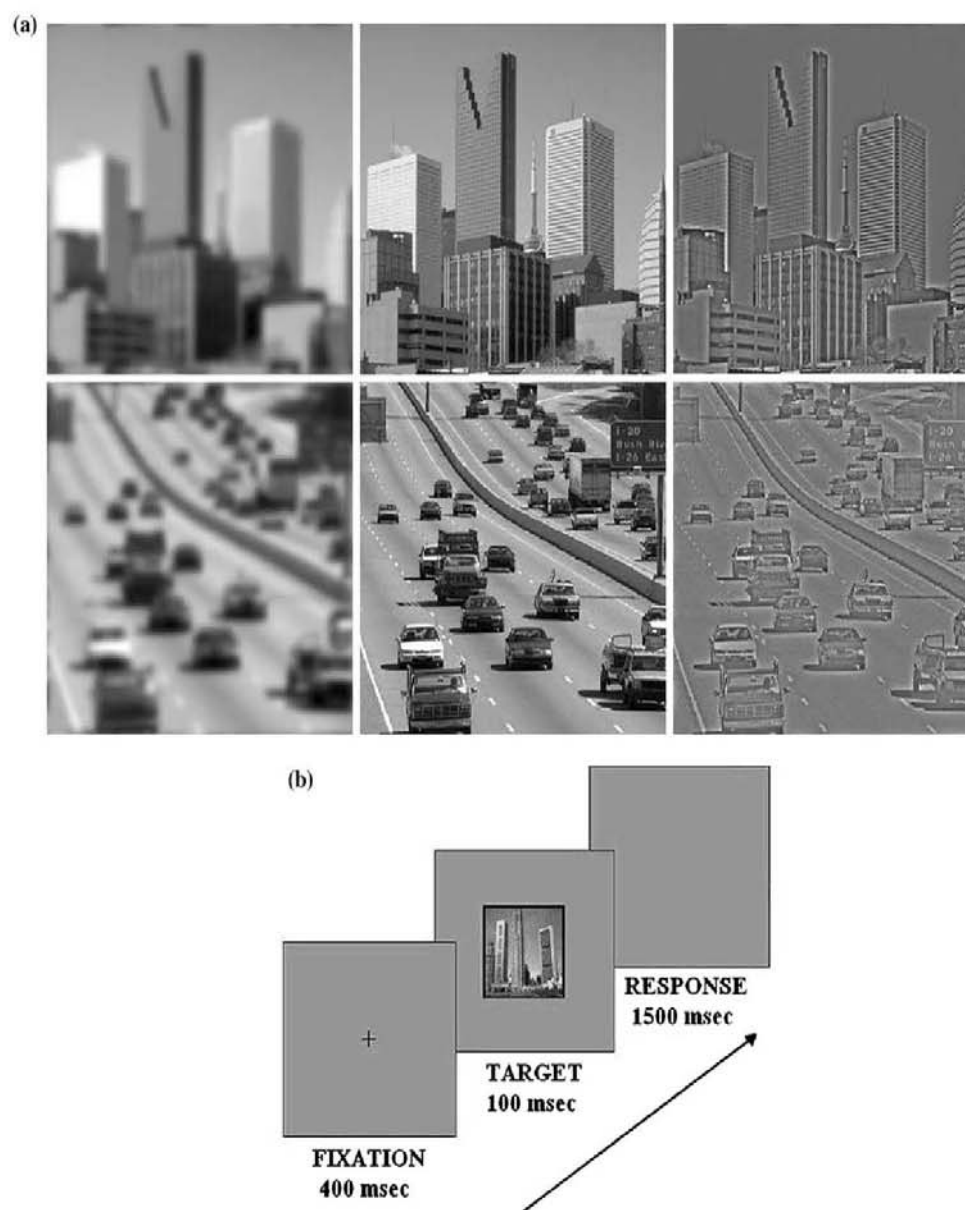


Fig. 2 a Examples of the filtered and non-filtered images of cities (top line) and highways (bottom line). From left to right: images are filtered in low spatial frequency (<4 cycles/degree), non-filtered, and filtered in high spatial frequency (>6 cycles/degree). b Time course of

a trial: at first, a fixation cross appeared at the centre of the screen, for 400 ms; then, the natural scene images appeared centrally for 100 ms; finally, a grey response screen was presented for 1,500 ms

images and below 6 cycles per degree of visual angle (i.e. high-pass cut-off of 24 cycles per image) for HSF scenes images. To create stimuli that did not bias visual processing the total energy for unfiltered (UF), LSF, and HSF images

was equalized for each scene (for further details, see Peyrin et al. 2006a). The stimuli and tasks were identical to that of Cavézan et al. (2010) except that the procedure was adapted to a block-design fMRI paradigm.

Scene and null stimuli were displayed against a grey background (128 grey-level scale) using E-prime 1.1 software (E-prime Psychology Software Tools INC., Pittsburgh, USA). They were transmitted into the scanner by means of a video projector, a projection screen in front of the scanner and a mirror mounted on the MRI head coil ($\sim 15.2 \times 11.5^\circ$ of visual angle) centred above the patient's eyes. The 24 scenes of stimuli were spread in three SF-blocks: a UF-block, a LSF-block, and a HSF-block. Each block contained 10 stimuli: 6 city scenes, 2 highway scenes, and 2 null images. The image presentation order within a block was randomized. Each participant performed two tasks during these blocks—a detection task (D) and a categorization task (C). In the detection task, subjects were instructed to press a response button each time they saw an image on the screen (whatever the category and the SF content of scenes) and the other button each time they saw nothing (the black frame on its own, i.e. the null image stimulus). In the categorization task, they were instructed to press a response button for “cities” and another one for “highways” (whatever the SF content of scenes). This resulted in 6 experimental conditions of particular interest for the purposes of the current study: D-UF, D-LSF, D-HSF, C-UF, C-LSF and C-HSF. Importantly, the detection and categorization tasks used the same stimuli, only the instructions changed.

A trial began with a central fixation cross for 400 ms immediately followed by a stimulus for 100 ms at the centre of the screen (see Fig. 2b for illustration). Participants gave their answer during the inter-trial interval fixed at 1,500 ms. They were instructed to fixate the centre of the screen during the whole image sequence, and to respond as quickly and accurately as possible. They used their right forefinger and middle finger to answer. The digit response was counterbalanced between participants. Responses (accuracy and response time) were recorded using a Serial Response box (Psychology Software Tools INC., Pittsburgh, USA) placed on the participant's abdomen and aligned with the mid-sagittal plane. Before the experiment (~ 20.8 days before), participants underwent the same experiment (with the same stimuli) outside the scanner in order to train them for this task.

A block design fMRI paradigm was used. Participants performed 4 functional sessions. Each session included 6 blocks (2 UF-blocks, 2 LSF-blocks and 2 HSF-blocks) for the detection task and 6 blocks (2 UF-blocks, 2 LSF-blocks and 2 HSF-blocks) for the categorization task. Each experimental block lasted 20 s. A rest period lasting 12 s was inserted between each block. This resulted in 5 rest periods for each experimental task. The instructions were verbally presented before the session and a fixed period of 40 s was inserted between the two experimental tasks in order to inform participants about the change in the task.

The order of experimental tasks and blocks within each task were counterbalanced between the sessions.

MR Acquisition and Data Analysis

Functional MR imaging was performed on a 1.5-T clinical MR imager (Philips Intera) equipped with echo-planar (EPI) acquisition. For functional scans, a T2*-weighted gradient echo sequence was used. Thirty-three adjacent axial slices parallel to the bi-commissural plane were acquired in sequential mode. Slice thickness was 3.6 mm. The main sequence parameters were: TR = 2909 ms, TE = 50 ms, flip angle = 90° , field of view = 240×240 mm, imaging matrix = 64×64 pixels, reconstruction matrix = 64×64 pixels, in-plane voxel-size = 3.75 mm. For each functional session, two initial dummy scans were performed in order to stabilize the magnetic field. After dummies, 124 functional scans were acquired during each session. No functional scans were acquired during the instruction periods. The total duration of each functional session was 6 min. and 40 s. Subsequent to the functional sessions, a T1-weighted high resolution three-dimensional scan (110 adjacent axial slices, 1.5 mm thickness each, in-plane voxel-size = 0.9 mm, TR = 20 ms, TE = 4.6 ms, field of view = 240×240 mm; imaging matrix = 240×240 pixels) was acquired to provide high spatial resolution anatomical information about the volume previously functionally examined.

Data analysis was performed using the general linear model (Friston et al. 1994) on SPM5 (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm) implemented in MATLAB 6.5 (The MathWorks, USA). We used two complementary analyses. First, all functional scans were first realigned to correct head motion using rigid body transformations and time-corrected in order to correct effects caused by the different acquisition time of each slice. Then, the functional scans of healthy controls were normalized to the MNI space. For patients, the functional scans were co-registered with their own anatomical images. Finally, the functional scans were spatially smoothed by using a Gaussian filter (8 mm width).

After pre-processing steps, statistical analysis was performed on functional images. Six experimental conditions (D-UF, D-LSF, D-HSF, C-UF, C-LSF and C-HSF) and the Rest condition were modelled as 7 regressors convolved with a canonical hemodynamic response function (HRF). The city/highway/null scene condition was orthogonal to our critical manipulation of SF and Tasks and not further considered in our fMRI analyses. Movement parameters derived from realignment corrections (3 translations and 3 rotations) were also entered in the design matrix as additional factors. The general linear model was then used to generate parameter estimates of activity at each voxel, for

each condition, and each participant. Statistical parametric maps were generated from linear contrasts between the HRF parameter estimates for the different experimental conditions. Statistical analyses were then performed separately for healthy controls and hemianopic patients. For both healthy controls and brain damaged patients, we first assessed at the individual level the whole network of cerebral areas involved in each experimental task by contrasting the detection and categorization conditions with resting: (D-UF + D-LSF + D-HSF) > Rest and (C-UF + C-LSF + C-HSF) > Rest contrasts.

For healthy controls only, we then performed random-effect group analyses on the contrast images from the individual analyses, using one-sample *t* tests. Clusters of activated voxels were then identified, based on the intensity of the individual responses ($p < 0.05$ FWE corrected for multiple comparisons, $T > 7.75$ and extended threshold of 5 voxels for contrasts calculated relative to the rest). Brain regions were reported according to the stereotaxic atlas of Talairach and Tournoux (1988). For patients, the clusters of activated voxels were identified at the individual level, based on the intensity of the individual responses.

Results

Although filtered images were used, the current study did not aim to specifically assess this factor (but focused on the modification of the hemispheric asymmetry by the cognitive demand and an occipital lesion). Thus, the type of images was included in all analyses and will not be presented in the following sections.¹

¹ For behavioural data, in healthy controls a significant main spatial frequency effect ($F_{2,26} = 9.61$, $p < 0.001$) as well as a significant spatial frequency \times task interaction were observed for ER ($F_{2,26} = 4.31$, $p < 0.05$) revealing a higher ER [$6.1 \% \pm 3.2$] when HSF-images were presented (compared to LSF [$0.6 \% \pm 0.1$] and UF [$0.1 \% \pm 0.02$]—images) in the detection task only (ER in the categorization task: HSF-images = $6.4 \% \pm 6.2$, LSF-images = $5.3 \% \pm 6.7$; UF-images = $5.6 \% \pm 4.6$). For RTs there was a significant spatial frequency effect ($F_{2,26} = 12.05$, $p < 0.001$) highlighting the classic coarse-to-fine time course for spatial frequency processing (i.e., longer RT for HSF than for LSF or UF-images; e.g., Cavérian et al. 2010). However, in each patient, the type of images did not influence ER or RTs. For imaging data, we investigated the specific role of spatial frequency in each task by extracting parameter estimates from the clusters activated within the occipito-temporal and parietal cortices in the detection task (left inferior occipital gyrus, right inferior occipital gyrus, and left superior parietal lobule) and the categorization task (left inferior occipital gyrus, left middle occipital gyrus, and left superior parietal lobule). These values were submitted into separate repeated-measure ANOVAs with Spatial Frequency as within-subjects factors. In healthy controls, only one area showed an activity depending on the spatial frequency in the categorization task. The left middle occipital gyrus showed greater activity when participants have to categorize scenes filtered in HSF than in LSF ($F_{1,13} = 13.05$, $p < 0.005$), while there was no difference between UF and HSF scenes ($F_{1,13} < 1$) or between UF and LSF scenes

Behavioral Results

Healthy Participants

Response accuracy, measured through the error rate (ER = percentage of erroneous responses), as well as response times (RTs) for correct responses (in ms) were recorded and analyzed as behavioural data. ER and RTs were submitted to repeated-measures analyses of variance (ANOVA) with Task (Detection vs. Categorization) and Spatial Frequency (LSF vs. HSF vs. UF) as within-subject factors. A main task effect was observed both on ER ($F_{1,13} = 5.88$, $p < 0.05$) and RTs ($F_{1,13} = 111.15$, $p < 0.0001$) such as performance was better in the detection ($3.43 \pm 1.93 \%$ and 453 ± 52 ms) than in the categorization ($4.82 \pm 3.94 \%$ and 544 ± 60 ms) task.

Hemianopic Patients

Performance in terms of ER on the Detection and Categorization tasks was compared to that of the 14 control participants (Fig. 3). For each task, modified *t* tests (Crawford et al. 2010) were carried out to compare the performance of each hemianopic patient with that of the control group. Furthermore, for the detection task, we performed additional analyses on the type of errors [percentage of misses (%Miss) and false alarms (%False Alarm)] in order to ensure that patients were active decision-makers rather than passive receivers of information. Modified *t* tests were also carried out to compare the performance of each hemianopic patient with that of the control group.

LBD Patients

For the detection task, all three LBD patients demonstrated a well within the normal range performance on the detection task (LBD1: 3.75% , $t_{13} = 0.16$, $p = 0.44$; LBD2: 4.58% , $t_{13} = 0.58$, $p = 0.29$; LBD3: 5.00% , $t_{13} = 0.79$, $p = 0.22$). Furthermore, the analyses on %Miss and %False Alarm revealed that, in comparison to the control group (2.62 and 6.55% , respectively), all right HH patients demonstrated well within the normal range for the %Miss (LBD1: 3.65% , $t_{13} = 0.71$, $p = 0.24$; LBD2: 3.65% , $t_{13} = 0.71$, $p = 0.24$; LBD3: 4.17% , $t_{13} = 1.08$, $p = 0.15$) and for the %False Alarm (LBD1: 4.17% , $t_{13} = -0.36$, $p = 0.36$; LBD2: 8.33% , $t_{13} = 0.27$, $p = 0.40$; LBD3: 8.33% , $t_{13} = 0.27$, $p = 0.40$) on the detection task.

Footnote 1 continued

($F_{1,13} = 2.38$, $p = 0.15$). The specific activation of that area was previously reported in Peyrin et al., 2004. However, in patients, the pattern of activation for spatial frequency was highly variable from one patient to another and seems difficult to interpret.

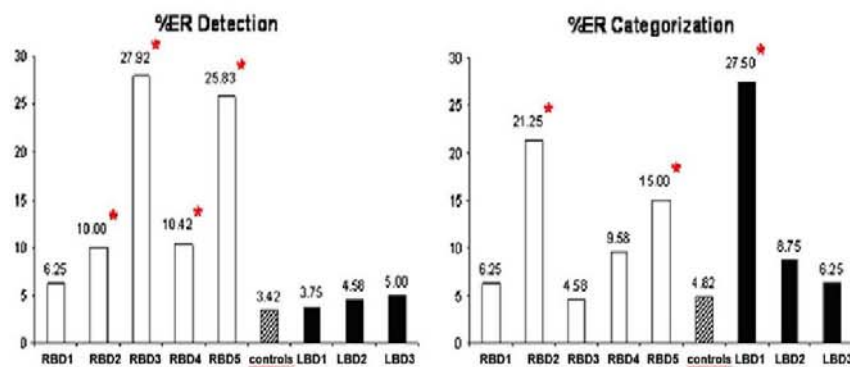


Fig. 3 Percentage of error rate (%ER) in the detection (left) and the categorization (right) tasks. The asterisk indicates significant difference between the corresponding patient and the control group (modified *t* test following the procedure described in Crawford et al. 2010). In the detection task, results showed the 4 out of 5 RBD

(RBD2, RBD3, RBD4, RBD5) exhibited a higher ER than controls whereas LBD performed as well as controls. However, in the categorization task, 2 RBD (RBD2, RBD5) and one LBD (LBD1) exhibited higher ER than controls

For the categorization task, one LBD patient showed significant lower performance in categorization than controls (LBD1: 27.50 %, $t_{13} = 5.56$, $p < 0.001$). The two remaining LBD patients scored well within the normal range (LBD2: 8.75 %, $t_{13} = 0.96$, $p = 0.18$; LBD3: 6.25 %, $t_{13} = 0.35$, $p = 0.37$).

RBD Patients

For the detection task, four out of the five RBD patients showed significant lower performance than controls (RBD2: 10.00 %, $t_{13} = 3.30$, $p < 0.05$; RBD3: 27.92 %, $t_{13} = 12.27$, $p < 0.001$; RBD4: 10.42 %, $t_{13} = 3.50$, $p < 0.05$; RBD5: 25.83 %, $t_{13} = 11.23$, $p < 0.001$). For the remaining patient RBD1, performance was also lower than the controls, but this difference failed to reach significance (6.25 %, $t_{13} = 1.42$, $p = 0.09$). The analyses on %Miss revealed that, in comparison to the control group (2.62 %), four RBD patients showed significantly lower performance (RBD2: 12.50 %, $t_{13} = 6.99$, $p < 0.001$; RBD3: 28.65 %, $t_{13} = 18.44$, $p < 0.001$; RBD4: 7.81 %, $t_{13} = 3.67$, $p < 0.05$; RBD5: 25.00 %, $t_{13} = 15.86$, $p < 0.001$). For the patient RBD1, performance was also lower than the controls, but this difference failed to reach significance (4.69 %, $t_{13} = 1.45$, $p = 0.08$). The analyses on %False Alarm revealed that, in comparison to the control group (6.55 %), three RBD patients showed significantly lower performance in detection (RBD3: 25.00 %, $t_{13} = 2.80$, $p < 0.05$; RBD4: 20.83 %, $t_{13} = 2.17$, $p < 0.05$; RBD5: 29.17 %, $t_{13} = 3.43$, $p < 0.05$). For the patient RBD1, performance was also lower than the controls, but this difference failed to reach significance (12.50 %, $t_{13} = 0.90$, $p = 0.19$). Only the patient RBD2 demonstrated performance well within the normal range (0.00 %, $t_{13} = -0.99$, $p = 0.17$). As a whole, RBD patients

were more impaired than controls in both their detections and rejections suggesting that they did not use a particular strategy to respond and that they are active decision-makers.

For the categorization task, two out of the five RBD patients showed significant lower performance (RBD2: 21.25 %, $t_{13} = 4.03$, $p < 0.001$; RBD5: 15 %, $t_{13} = 2.50$, $p < 0.05$). The three remaining RBD patients scored well within the normal range on the categorization task (RBD1: 6.25 %, $t_{13} = 0.35$, $p = 0.37$; RBD3: 4.58 %, $t_{13} = -0.06$, $p = 0.48$; RBD4: 9.58 %, $t_{13} = 1.17$, $p = 0.13$).

Overall, detection performance differed significantly from controls in four out of five RBD patients whereas in categorization only two RBD patients were significantly impaired.

fMRI Data

Healthy Participants

Brain regions activated in the detection and in the categorization tasks are summarized in Table 2 and illustrated in Fig. 4. The detection task activated the left occipital-temporal cortex (inferior occipital gyrus and fusiform gyrus, BA 18 and 37), the right occipital cortex (at the level of the inferior occipital gyrus, BA 18) and the bilateral superior parietal lobules (BA 7). The categorization task activated the left occipital-temporal cortex (including the inferior occipital gyrus and fusiform gyrus, BA 18 and 37), the left middle occipital gyrus (BA 19) and the bilateral superior parietal lobules (BA 7).

Hemianopic Patients

LBD Patients In LBD1, the same network was activated in both tasks. Activation was observed in the inferior,

Table 2 Cerebral regions activated during (a) the detection task contrasted to the resting state and (b) the categorization task contrasted to the resting state

Contrasts	Area	Side	BA	k	x	y	z	T
<i>(a) Detection task</i>								
[detection > resting]	Superior parietal lobule/Precuneus	L	7	79	-26	-52	49	16.66
	Inferior occipital gyrus	L	18	92	-33	-84	-2	14.45
	[Inferior temporal gyrus/Fusiform gyrus]		37		-37	-59	-9	13.41
	Precentral gyrus	L	4/6	57	-45	-8	53	11.15
	Inferior occipital gyrus	R	18	26	41	-84	-2	10.75
	Superior parietal lobule	R	7	7	30	-56	46	9.49
	Cerebellum	R	-	15	26	-59	-21	9.19
	Inferior frontal gyrus	L	9	5	-52	9	26	8.89
	Middle frontal gyrus	R	6	9	30	-5	50	8.84
	Middle frontal gyrus	L	6	7	-26	-5	53	8.43
<i>(b) Categorization task</i>								
[categorization > resting]	Inferior temporal gyrus/Fusiform gyrus	L	37	82	-41	-62	-9	21.99
	[Inferior occipital gyrus]		18		-33	-84	-2	10.65
	Superior parietal lobule/Precuneus	L	7	45	-26	-52	52	14.13
	Superior frontal gyrus	L	6	11	-4	10	49	11.28
	Precentral gyrus	L	4/6	106	-41	-8	53	10.76
	Superior parietal lobule	R	7	6	30	-56	43	10.46
	Middle occipital gyrus	L	19	31	-33	-87	14	10.16
			18		-30	-91	5	8.65
	Inferior frontal gyrus	L	9	8	-56	9	26	9.60
	Inferior frontal gyrus	R	9	10	41	9	26	9.32
	Cerebellum	R	-	13	30	-48	-22	8.78

For each cluster, the region showing the maximum t value is listed first, followed by the other regions belonging to the cluster [between brackets]. The Talairach coordinates (x, y, z) are indicated

R right hemisphere, L left hemisphere, BA Brodmann area, k number of voxels in the cluster

middle and superior occipital cortices (BA 17/18/19) predominantly in the right non-lesioned hemisphere, and in the right inferior occipito-temporal cortex (BA 19/37). In LBD2, and as in the previous patient, the same network was activated in both tasks. In the right hemisphere, increased signal was observed in the inferior, middle and superior occipital cortices (BA 18/19), the inferior temporal gyrus (BA 37), the angular gyrus (BA 39), and the superior parietal lobule (BA 7). In the left damaged hemisphere, increased activity was observed around the lesion, in the occipito-parietal cortex (BA 39/7), and the temporal cortex (BA 37). In LBD3, only the right inferior occipito-temporal cortex (BA 19/37) was activated in both tasks.

Overall, for the three LBD patients, the detection task and the categorization task activated a similar network (Fig. 5) whereas both tasks were underlined by slightly different networks in healthy participants.

RBD Patients As in LBD patients, a common network of posterior activations was observed in both tasks for all RBD patients (Fig. 5). In RBD1, both tasks activated a

similar network including the inferior occipital (BA 18), temporal (BA 37) and parietal (BA 39) cortices, but this time, bilaterally. Moreover, an increased signal was observed in the left non-lesioned middle occipital cortex (BA 19). In RBD2, increased activity was observed bilaterally in the inferior and middle occipital cortices (BA 18/19) and in the left non-lesioned inferior parietal cortex (BA 40). The same network of activation was observed in both tasks. In RBD3, the two tasks activated a common cortical network including the occipito-temporal bilaterally (BA 17/18/19/37) and the parietal cortex (BA 40/7, predominantly in the left non-lesioned hemisphere). In RBD4, increased signal was observed bilaterally in the lateral occipital cortex (BA 18/19) and in the inferior occipito-temporal cortex (BA 37), as well as in the left non-lesioned striate cortex (BA 17) in both tasks. Finally, in RBD5, increased signal was observed bilaterally in the lateral occipital cortex (BA 18/19), inferior occipito-temporal cortex (BA 37) and superior parietal cortex (BA 7). As in other RBD patients, the activated network was similar in both tasks.

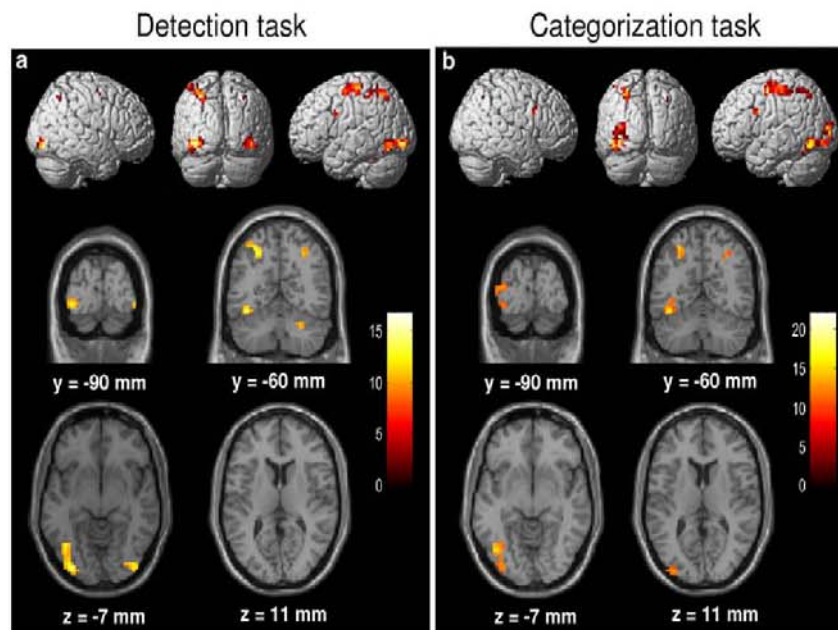


Fig. 4 Activated regions provided by the random effect group analysis in healthy controls by contrasting **a** the detection task to resting and **b** the categorization task to resting. Images are presented in the neurological convention where the right hemisphere is on the right side and the left hemisphere on the left side. At the level of the occipital cortex, the detection task produced greater activation in the

inferior occipital gyrus bilaterally while the categorization task produced greater activation in the left inferior occipital gyrus and the left middle occipital gyrus. The colour scale represents the t value of activation ($p < 0.05$ FWE corrected for multiple comparisons). The Talairach coordinates (x, y, z) are reported. See Table 2 for further details

Overall, like LBD patients, the five RBD patients showed a similar network in both tasks. However, in contrast to what was observed in LBD patients, increased activation was distributed between both hemispheres and included the inferior lateral occipital cortex (BA 18/19) for all RBD patients.

Discussion

The current study aimed to assess visuospatial processing in the central, supposed preserved, visual field in hemianopia as well as cortical activity in the occipital lobe in patients and controls during a visual task. Detection and categorization tasks of natural scene images were used to additionally evaluate any effect of the cognitive demand in healthy participants and hemianopic patients.

Overall, our results confirmed that depending only on the given instructions, the two tasks did not induce exactly the same pattern of cerebral activation (although overlapping) in healthy participants. In addition, as discussed below, data in hemianopic patients highlighted that unilateral occipital damage alters visual processing in the

central visual field although the behavioural deficit as well as the reorganization in the occipital lobe may depend upon the lesion side.

Effect of the Task Instruction on Cortical Activation in Controls

Consistent with previous reports (e.g., Fink et al. 2002), changing the instructions, but neither the stimuli nor the procedure, leads to a somewhat differential activation in visual areas in control participants. Moreover, excepting a common activation in the left inferior occipital gyrus, both tasks generated a different occipital asymmetry in that the detection task engages the right inferior occipital gyrus whereas the categorization task engages the left middle occipital gyrus. This occipital asymmetry is consistent with previous imaging data in healthy controls (e.g., Chokron et al. 2000; Han et al. 2002) showing that the right hemisphere is preferentially engaged when attention is oriented toward the global level (such as in our detection task where global information is enough to complete the task); whereas the left hemisphere is preferentially engaged when attention is oriented toward the local level (such as in our

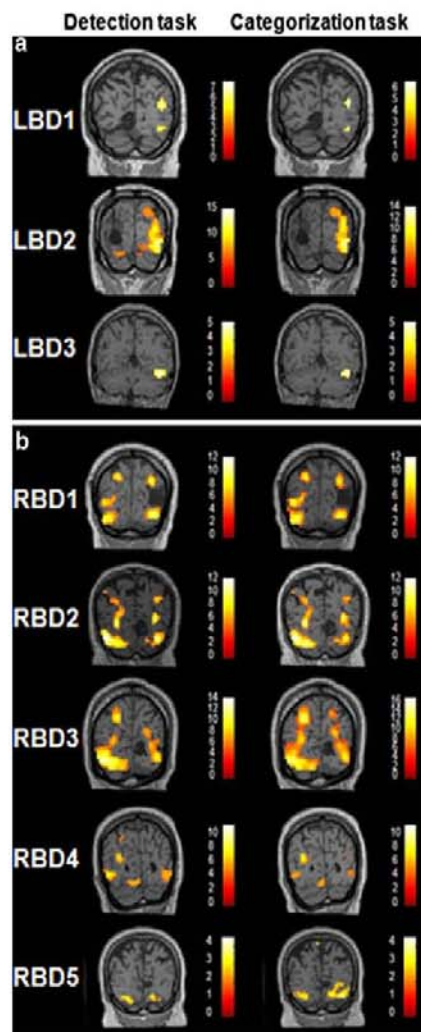


Fig. 5 Signal change associated with the comparison between the task condition (*left side*: detection task; *right side*: categorization task) and the resting condition presented separately for left brain damaged (a) and right brain damaged (b) patients (LBD and RBD respectively). Images are presented in the neurological convention where the right hemisphere is on the *right* side and the left hemisphere on the *left* side

categorization task where at least some details have to be processed to distinguish cities from highways).

The existence of a differential network in the two tasks (although overlapping) confirmed that the pattern of functional lateralization may depend upon the stimuli or task characteristics (e.g., Grabowska and Nowicka 1996). Although the common network activated in detection and categorization is consistent with the assumption of a

common processing, the differential brain activation between both tasks indeed suggests that these two abilities rely on distinct neural processes as proposed by some authors (Mack et al. 2008; Cavézian et al. 2010). The differential recruitment of the right and left occipital lobes in healthy participants for detection and categorization, respectively (i.e., depending on verbal instructions only), probably results from the well-known top-down modulation from associative areas to visual areas (e.g., Corbetta et al. 1990; Fink et al. 2002). As a matter of fact, using positron emission tomography (PET) during a visual discrimination task, Corbetta and colleagues (1990) demonstrated that attention enhanced the activity of different regions of extrastriate visual cortex that appear to be specialized for processing specific visual information related to the task instructions. As we will discuss below, the present findings in both healthy and brain-damaged patients thus raise the question of an interaction between intra-hemispheric effects (top-down modulation) as well as inter-hemispheric factors (hemispheric specialization depending on the task nature).

Alteration of the Central Visual Field and Loss of Task Specificity Activation in Hemianopic Patients

Overall, patients' results showed that a unilateral occipital lesion, either right or left, alters visual processing in the central visual field. This is in agreement with recent studies showing that hemianopia, regardless of its clinical characteristics (i.e., macular sparing or not, lesion localization and extent...) cannot be summarized as a loss of conscious vision and the presence of blindsight phenomenon in the contralesional visual field (Weiskrantz et al. 1974), but is indeed associated with visual impairments in the central (Cavézian et al. 2010) and in the ipsilesional (Paramei and Sabel 2008) visual fields. In addition, imaging data revealed a loss of task-specific activation in patients in contrast to healthy controls who showed a different activation depending on the task. With respect to the top-down modulation hypothesis above discussed (e.g., Corbetta et al. 1990), our results suggest that, whatever the lesion side, the occipital lesion makes it impossible for associative areas to correctly orient processing in the occipital lobe and thus suppress the task-specific activation. In this way, patients' activations seem to result more from the physical aspects of the task (because the two tasks are exactly the same, only the verbal instruction differs) than from the cognitive process induced by the given verbal instruction (as seen in healthy controls). In this way, the absence of a specific effect of instruction on cortical activity suggests a reorganization of the connectivity within the visual system due to the unilateral occipital lesion, inducing a rather 'passive' visual cortical response

compared to healthy participants whose cortical activation is sensitive to the verbal instruction.

Effect of Lesion Side on Performance and Cortical Activity in Hemianopic Patients

The interaction between the lesion side and the performance of HH patients in detection and categorization in the central visual field reported here is in accordance with previous data obtained in normal and brain-damaged patients emphasizing the hemispheric specialization for detection and categorization (e.g., Cavézian et al. 2010; Kitterle et al. 1990; Peyrin et al. 2006b). Moreover, it has been shown that a right occipital lesion leads to altered performance in low- as well as in high-demand cognitive tasks (detection and categorization tasks), whereas a left occipital lesion leads to alter performance only in high-demand cognitive tasks (categorization task) (Cavézian et al. 2010).

Although the SF content of the picture did not significantly affect patients' performance in the present study the difference between right and left brain-damaged patients is also in agreement with an early hemispheric asymmetry previously suggested for perceptual parameters, such as spatial frequency (Cavézian et al. 2010; Peyrin et al. 2004; 2006b; see for discussion Mecacci 1993). Overall, similar to what has been described for the parietal lobes in spatial processing (Heilman and Van Den Abell 1980), the right and the left occipital lobes could not be exactly equivalent in visual processing and there could be an early specific specialization, at the occipital lobe level, as discussed below.

Cortical Reorganization in Hemianopic Patients and Hemispheric Specialization

Although our results are consistent with previous studies reporting an intra-hemispheric and/or an inter-hemispheric reorganization in hemianopia (e.g., Bridge et al. 2008; Silvanto et al. 2007), it seems that both types of reorganization can be found depending on the occipital lesion side with a predominant intra-hemispheric reorganization after a left occipital lesion, but a predominant inter-hemispheric reorganization after a right occipital lesion. In agreement with the classical view, the right hemisphere is predominant for visuo-spatial processing in the whole extrapersonal space (Heilman and Van Den Abell 1980), and the right parietal cortex is able to assume most of visual functions of the left parietal cortex. Along those lines, the right occipital lobe may be able to assume part of visuo-spatial processing normally completed in the left occipital lobe. Conjointly, the left occipital lobe, because of the left hemisphere predominance in language/verbal processing,

may be unable to assume visuo-spatial processing normally completed in the right occipital lobe. Consistent with such a framework, a left occipital lesion would lead to an accentuated activity in the right hemisphere (to compensate for the "loss" of the visuospatial processing normally assumed by the left occipital lobe), whereas right occipital damage would lead to the recruitment of a more extended network involving both hemispheres in an attempt to compensate for the "loss" of the visuospatial processing normally assumed by the right occipital lobe.

Thus far, studies investigating cortical reorganization in hemianopic patients had not considered the question of early hemispheric asymmetry at the occipital level. Indeed, these studies assessed either right hemianopic—LBD patients (e.g., Bridge et al. 2008; Henriksson et al. 2007; Marshall et al. 2008; Raninen et al. 2007; Silvanto et al. 2007) or artificially constituted a group of right hemianopic—LBD patients by flipping across the mid-sagittal plane imaging data from left hemianopes—RBD (Nelles et al. 2002, 2007, 2009). These different authors reported functional and anatomical modifications in the intact and/or the damaged hemisphere, including within the occipital lobe. For example, it has been shown that the intact occipital lobe (the extrastriate areas) was engaged in the processing of visual information from the ipsilateral visual field (i.e. the contralesional blind visual field) in addition to its normal implication in the processing of visual information from the contralateral visual field (Henriksson et al. 2007; Nelles et al. 2007). Using Diffusion Tensor Imaging or Transcranial Magnetic Stimulation, different authors proposed that this "transfer" of activity is possible because of connections between the "intact" lateral geniculate nucleus (i.e., in the intact hemisphere) to the contralateral associative visual area V5 (i.e., in the damaged hemisphere), as well as a cortico-cortical connection between right and left V5 areas particularly developed in hemianopic patients (Bridge et al. 2008; Silvanto et al. 2007; 2009). Regarding the population assessed in these different studies, these results may be considered as specific to right hemianopia—LBD although definite conclusions are difficult (if not impossible) because of the "artificial" right hemianope—LBD groups in the literature.

Cortical Reorganization After Peripheral or Cortical Damage

Most of the previous studies investigated cortical activation (and reorganization) when the contralesional, blind visual field was stimulated. It was thus proposed that pre-existing callosal pathways (between both occipital lobes) and/or an alternative inter-hemispheric connection through the superior colliculi contribute to the redistribution of the cortical activation in the occipital lobe (e.g., Nelles et al.

2007). These assumptions are consistent with data collected in patients with a peripheral damage of the visual system (i.e. retina or optic nerve). Here again, studies revealed that change in afferent input is associated to changes in the strength of pre-existing connections as well as in cortico-cortical and cortico-subcortical coherences (for review, Pascual-Leone et al. 2005). Conjointly, considerable plasticity in primary sensory areas of adult cortex and dramatic crossmodal reorganization of visual areas is observed after short-term or long-term visual deprivation (e.g., Boucard et al. 2009; for review, Merabet and Pascual-Leone 2010). Overall, it could well be the case that common mechanisms participate in differential reorganization following peripheral or cortical damage (Eysel et al. 1999). In the same way, different recent neuroimaging studies illustrated how the pre-existing functional specialization of cortical sub-regions appears to be preserved following sensory deprivation (see for review and discussion, Voss and Zatorre 2012). For example, Renier et al. (2010) using fMRI tested whether processing of auditory versus tactile information and spatial versus nonspatial information was dissociated in the occipital cortex of the early blind. These authors showed that although no modality-specific activation was observed in the occipital cortex of blind subjects, the *right* middle occipital gyrus (MOG) showed a preference for *spatial* over nonspatial processing of both auditory and tactile stimuli. Furthermore, MOG activity was correlated with accuracy of individual sound localization performance. In sighted controls, most of extrastriate occipital cortex, including the MOG, was deactivated during auditory and tactile conditions, but the *right* MOG was also more activated during *spatial* than nonspatial visual tasks. Thus, although the sensory modalities driving the neurons in the reorganized occipital cortex of blind individuals are altered, the functional specialization of extrastriate cortex is retained regardless of visual experience.

Conclusion

The present results highlights that hemianopic patients may suffer from subtle although significant deficits in the central visual field that could account for their disabilities in activities of daily living, such as driving (Tant et al. 2002) or reading (Leff et al. 2006), and thus confirmed recent behavioural findings (Cavézian et al. 2010). Moreover, a few studies highlighted visual and attentional deficits in the ipsilesional visual field in hemianopia (Paramei and Sabel 2008; Rizzo and Robin 1996). In this way, although the central and the ipsilesional visual fields are usually used in clinical practice and rehabilitation to compensate for contralesional deficits (for review Trauzettel-Klosinski 2011;

Lam et al. 2010; see for discussion Chokron et al. 2008), they may not be as preserved as classically assumed.

The second main finding of this study is the fact that a unilateral occipital lesion may induce a loss of specificity in cortical activation regarding the visual task performed. This finding evokes a modification of bottom-up and top-down modulations within the visual cortex (Lamme and Spekreijse 2000; Lee 2002; Roelfsema et al. 1998) and confirms that an early lesion to the visual system (V1), in the left or in the right hemisphere may alter this complex connectivity within the visual system even when the scene is presented to the central visual field.

According to recent studies, cortical reorganization after a visual system damage can occur any time after the lesion, at all ages and in all types of visual field impairments after retinal or brain damage (stroke, neurotrauma, glaucoma, amblyopia, age-related macular degeneration; Sabel et al. 2011). The third finding of the present study is that in hemianopic patients, cortical reorganization could depend on the occipital lesion side. Regarding our recent clinical and experimental studies (Chokron et al. 2008; Cavézian et al. 2010), the lesion location seems to play a major role compared to other factors such as the age at lesion or the aetiology. In addition, it seems unlikely that eye movements could occur and explain the lesion lateralization effect in protocols where the time presentation is as short as 100 ms, as in the present experiment. However, further experiments should nevertheless thoroughly investigate this question by testing a larger patient group in order to control for the patients' age at lesion, aetiology, volume, and precise intra-hemispheric location of the lesion, while monitoring eye movements to test if these factors could influence the pattern of performance obtained here. Along the same lines, patients could be tested in a monocular condition in order to test for the presence of a squinting phenomenon influencing the performance.

To conclude, if confirmed, the present preliminary findings suggesting a hemispheric specialization at the occipital level have strong implications not only at a basic level but also at a clinical one since they may lead clinicians to design specific training programs for left and right hemianopic patients (RBD and LBD respectively).

Acknowledgments This research was supported by the Edmond and Benjamin de Rothschild Foundations (Geneva, Switzerland, & New York, USA).

References

- Boucard CC, Hernowo AT, Maguire RP, Jansoni NM, Roerdink JB, Hooymans JM, Cornelissen FW (2009) Changes in cortical grey matter density associated with long-standing retinal visual field defects. *Brain* 132:1898–1906

- Bridge H, Thomas O, Jhabdi S, Cowey A (2008) Changes in connectivity after visual cortical brain damage underlie altered visual function. *Brain* 131:1433–1444
- Cavérian C, Gaudry I, Perez C, Coubar O, Doucet G, Peyrin C, Marendaz C, Obadia M, Gout O, Chokron S (2010) Specific impairments in visual processing following lesion side in hemianopic patients. *Cortex* 46:1123–1131
- Chokron S, Brickman AM, Wei T, Buchsbaum MS (2000) Hemispheric asymmetry for selective attention. *Brain Res Cogn Brain Res* 9:85–90
- Chokron S, Perez C, Obadia M, Gaudry I, Laloum L, Gout O (2008) From blindsight to sight: cognitive rehabilitation of visual field defects. *Restor Neurol Neurosci* 26:305–320
- Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Petersen SE (1990) Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans. *Science* 248:1556–1559
- Coubar OA, Perez C, Kazandjian S, Gaudry I, Marendaz C, Guyader N, Peyrin C, Chokron S (2011) Visual demand and visual field presentation influence natural scene processing. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 249(2):223–232
- Crawford JR, Garthwaite PH, Porter S (2010) Point and interval estimates of effect sizes for the case-controls design in neuropsychology: rationale, methods, implementations, and proposed reporting standards. *Cogn Neuropsychol* 27:245–260
- Eysel UT, Schweigart G, Mittmann T, Eyding D, Qu Y, Vandesande F, Orban G, Arekens L (1999) Reorganization in the visual cortex after retinal and cortical damage. *Restor Neurol Neurosci* 15(2–3):153–164
- Fink GR, Halligan PW, Marshall JC, Frith CD, Frackowiak RS, Dolan RJ (1996) Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature* 382:626–628
- Fink GR, Marshall JC, Weiss PH, Toni I, Zilles K (2002) Task instructions influence the cognitive strategies involved in line bisection judgements: evidence from modulated neural mechanisms revealed by fMRI. *Neuropsychologia* 40:119–130
- Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ, Poline JP, Frith CD, Frackowiak RSJ (1994) Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Hum Brain Mapp* 2:189–210
- Grabowska A, Nowicka A (1996) Visual-spatial-frequency model of cerebral asymmetry: a critical survey of behavioral and electrophysiological studies. *Psychol Bull* 120:434–449
- Han S, Weaver JA, Murray SO, Kang X, Yund EW, Woods DL (2002) Hemispheric asymmetry in global/local processing: effects of stimulus position and spatial frequency. *NeuroImage* 17:1290–1299
- Heilman KM, Van Den Abell T (1980) Right hemisphere dominance for attention: the mechanism underlying hemispheric asymmetries of inattention (neglect). *Neurology* 30:327–330
- Henriksson L, Raninen A, Nasanen R, Hyvarinen L, Vanni S (2007) Training-induced cortical representation of a hemianopic hemifield. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 78:74–81
- Kitterle FL, Christman S, Hellige JB (1990) Hemispheric differences are found in the identification, but not the detection, of low versus high spatial frequencies. *Percept Psychophys* 48:297–306
- Lamme VA, Spekreijse H (2000) Modulations of primary visual cortex activity representing attentive and conscious scene perception. *Front Biosci* 5:D232–D243
- Lee TS (2002) Top-down influence in early visual processing: a Bayesian perspective. *Physiol Behav* 77(4–5):645–650
- Leff AP, Spitsyna G, Plant GT, Wise RJ (2006) Structural anatomy of pure and hemianopic alexia. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 77:1004–1007
- Luu S, Lee AW, Daly A, Chen CS (2010) Visual field defects after stroke—a practical guide for GPs. *Aust Fam Physician* 39(6):499–503
- Lux S, Marshall JC, Ritzl A, Weiss PH, Pietrzyk U, Shah NJ, Zilles K, Fink GR (2004) A functional magnetic resonance imaging study of local/global processing with stimulus presentation in the peripheral visual hemifields. *Neuroscience* 124:113–120
- Mack ML, Gauthier I, Sadr J, Palmeri TJ (2008) Object detection and basic-level categorization: sometimes you know it is there before you know what it is. *Psychon Bull Rev* 15:28–35
- Marshall RS, Ferrera JJ, Barnes A, Xian Z, O'Brien KA, Chmayssani M, Hirsch J, Lazar RM (2008) Brain activity associated with stimulation therapy of the visual borderzone in hemianopic stroke patients. *Neurorehabil Neural Repair* 22:136–144
- Mecacci L (1993) On spatial frequencies and cerebral hemispheres: some remarks from the electrophysiological and neuropsychological points of view. *Brain Cogn* 22(2):199–212
- Merabet LB, Pascual-Leone A (2010) Neural reorganization following sensory loss: the opportunity of change. *Nat Rev Neurosci* 11(1):44–52
- Nelles G, Widman G, de Greiff A, Meistrowitz A, Dimitrova A, Weber J, Forsting M, Esser J, Diener HC (2002) Brain representation of hemifield stimulation in poststroke visual field defects. *Stroke* 33:1286–1293
- Nelles G, de Greiff A, Pscherer A, Forsting M, Gerhard H, Esser J, Diener HC (2007) Cortical activation in hemianopia after stroke. *Neurosci Lett* 426:34–38
- Nelles G, Pscherer A, de Greiff A, Forsting M, Gerhard H, Esser J, Diener HC (2009) Eye-movement training-induced plasticity in patients with post-stroke hemianopia. *J Neurol* 256:726–733
- Oldfield RC (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9:97–113
- Oliva A, Schyns PG (1997) Coarse blobs or fine edges? Evidence that information diagnosticity changes the perception of complex visual stimuli. *Cogn Psychol* 34:72–107
- Paramei GV, Sabel BA (2008) Contour-integration deficits on the intact side of the visual field in hemianopia patients. *Behav Brain Res* 188:109–124
- Pascual-Leone A, Amedi A, Fregni F, Merabet LB (2005) The plastic human brain cortex. *Annu Rev Neurosci* 28:377–401
- Peyrin C, Chauvin A, Chokron S, Marendaz C (2003) Hemispheric specialization for spatial frequency processing in the analysis of natural scenes. *Brain Cogn* 53:278–282
- Peyrin C, Baci M, Segebarth C, Marendaz C (2004) Cerebral regions and hemispheric specialization for processing spatial frequencies during natural scene recognition. An event-related fMRI study. *NeuroImage* 23:698–707
- Peyrin C, Chokron S, Guyader N, Gout O, Moret J, Marendaz C (2006a) A neural correlates of spatial frequency processing: a neuropsychological approach. *Brain Res* 1073–1074:1–10
- Peyrin C, Mermillod M, Chokron S, Marendaz C (2006b) Effect of temporal constraints on hemispheric asymmetries during spatial frequency processing. *Brain Cogn* 62:214–220
- Peyrin C, Michel CM, Schwartz S, Thut G, Seghier M, Landis T, Marendaz C, Vuilleumier P (2010) The neural substrates and timing of top-down processes during coarse-to-fine categorization of visual scenes: a combined fMRI and ERP study. *J Cogn Neurosci* 22:2768–2780
- Raninen A, Vanni S, Hyvarinen L, Nasanen R (2007) Temporal sensitivity in a hemianopic visual field can be improved by long-term training using flicker stimulation. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 78:66–73
- Renier LA, Amurova I, De Volder AG, Carlson S, VanMeter J, Rauschecker JP (2010) Preserved functional specialization for spatial processing in the middle occipital gyrus of the early blind. *Hum Brain Mapp* 31(1):1–13

- Rizzo M, Robin DA (1996) Bilateral effects of unilateral visual cortex lesions in human. *Brain* 119(Pt 3):951–963
- Robertson LC, Delis DC (1986) Part-whole processing in unilateral brain-damaged patients: dysfunction of hierarchical organization. *Neuropsychologia* 24:363–370
- Roelfsema PR, Lamme VA, Spekreijse H (1998) Object-based attention in the primary visual cortex of the macaque monkey. *Nature* 395(6700):376–381
- Sabel BA, Henrich-Noack P, Fedorov A, Gall C (2011) Vision restoration after brain and retina damage: the residual vision activation theory. *Prog Brain Res* 192:199–262 Review
- Schadow J, Dettler N, Paramei GV, Lenz D, Fründ I, Sabel BA, Herrmann CS (2009) Impairments of Gestalt perception in the intact hemifield of hemianopic patients are reflected in gamma-band EEG activity. *Neuropsychologia* 47(2):556–568
- Sergent J (1982) The cerebral balance of power: confrontation or cooperation? *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 8:253–272
- Silvanto J, Cowey A, Lavie N, Walsh V (2007) Making the blindsighted see. *Neuropsychologia* 45:3346–3350
- Silvanto J, Walsh V, Cowey A (2009) Abnormal functional connectivity between ipsilesional V5/MT + and contralesional striate cortex (V1) in blindsight. *Exp Brain Res* 193:645–650
- Talairach J, Tournoux P (1988) Thieme, New York. Co-planar stereotaxic atlas of the human brain. 3-Dimensional proportional system: an approach to cerebral imaging
- Tant ML, Cornelissen FW, Kooijman AC, Brouwer WH (2002) Hemianopic visual field defects elicit hemianopic scanning. *Vision Res* 42:1339–1348
- Trauzettel-Klosinski S (2011) Rehabilitative techniques. *Handb Clin Neurol* 102:263–278
- Voss P, Zatorre RJ (2012) Organization and reorganization of sensory-deprived cortex. *Curr Biol* 22(5):R168–R173
- Voyer D (1996) On the magnitude of laterality effects and sex differences in functional lateralities. *Laterality* 1:51–83
- Weiskrantz L, Warrington EK, Sanders MD, Marshall J (1974) Visual capacity in the hemianopic field following a restricted occipital ablation. *Brain* 97:709–728
- Wilkinson DT, Halligan PW, Marshall JC, Buchel C, Dolan RJ (2001) Switching between the forest and the trees: brain systems involved in local/global changed-level judgments. *NeuroImage* 13:56–67

4. Discussion

4.1. Etude en IRMf

Dans l'ensemble, ces données mettent en évidence une activation différente des aires extrastriées chez les patients HLH, à savoir une activation bilatérale chez les patients HLHg mais une activation préférentiellement à droite chez les patients HLHd.

4.1.1. Chez les sujets contrôles

Tout d'abord, les résultats chez les participants contrôles montrent l'activation d'un réseau commun pour la réalisation de la tâche sous les deux consignes (détection *vs* catégorisation). Ce réseau implique notamment la jonction occipito-temporo pariétale gauche, et correspond aux structures classiquement impliquées dans les tâches visuo-spatiales. De plus, nos données confirment un traitement différentiel de l'information visuelle selon la consigne (selon la tâche réalisée par le sujet) (Mack et *al.*, 2008). En effet, alors qu'il existe une activation occipitale bilatérale dans la détection, l'activation est plus latéralisée dans l'hémisphère gauche pour la catégorisation. Tout comme cela avait été montré dans une tâche de bissection de lignes (Fink et *al.*, 2002), un simple changement de consigne modifie donc le réseau cortical sous-tendant le traitement d'images de scènes naturelles. Dans l'ensemble, les données recueillies chez le participant sain suggèrent que les tâches de détection et de catégorisation sont sous-tendues par un réseau commun mais aussi par des réseaux qui sont spécifiques dès les aires occipitales. Dès lors, les répercussions d'une lésion occipitale unilatérale sur les processus visuels devraient différer selon sa latéralisation.

4.1.2. Chez les patients HLH droit cérébro-lésés gauche

Les résultats obtenus chez ces patients HLHd, cérébro-lésés gauche, montrent une utilisation préférentielle de l'hémisphère droit sain, quelle que soit la consigne (détection ou catégorisation). Par conséquent, et à l'inverse de ce qui est observé chez les participants témoins, il n'existe pas d'activation spécifique en fonction de la tâche demandée chez ces patients. On observe donc une disparition de la spécificité de l'activation hémisphérique en fonction de la tâche demandée. Ces données mettent aussi en évidence une forme de réorganisation telle que, dans la tâche de catégorisation, c'est l'hémisphère droit et non le gauche, comme chez les participants contrôles qui est recruté.

4.1.3. Chez les patients HLH gauche cérébro-lésés droit

Les données IRMf obtenues chez les patients HLHg, cérébro-lésés droit, montrent une activation occipitale bilatérale quelle que soit la tâche demandée. Tout comme pour les patients HLHd, il n'existe donc plus d'activation spécifique en fonction de la demande spécifique de la tâche (induite par la consigne). Ce résultat révèle aussi une activation de l'hémisphère droit pourtant lésé et confirme donc les rares études antérieures qui ont montré qu'une activation périlésionnelle restait possible (Nelles et *al.*, 2007 ; Pleger et *al.*, 2003).

L'ensemble de nos données montre que chez les participants contrôles, les tâches de détection et de catégorisation de scènes naturelles sont sous-tendues par un réseau commun mais aussi par un réseau spécifique d'aires visuelles corticales. Chez les patients hémianopsiques, notre travail met en évidence un pattern de plasticité spécifique à la latéralisation de la lésion. De plus, le réseau cortical recruté n'est plus spécifique à la tâche demandée chez ces patients. Ceci soulève la question des limites de la réorganisation corticale mais également du rôle de la spécialisation hémisphérique chez le sujet sain. En effet l'efficacité semble aller de paire avec une grande spécificité des aires activées en fonction de chaque tâche ou en fonction de la consigne donnée.

4.2. Réorganisation corticale

Une question reste en suspend, à savoir : est-il possible de moduler cette réorganisation corticale en améliorant les performances comportementales à l'aide d'un apprentissage intensif ? Avant de présenter dans le chapitre suivant les différentes techniques de réhabilitation des amputations du champ visuel d'origine centrale, il convient de présenter ici les études ayant visé à démontrer qu'on pouvait influencer expérimentalement les processus de réorganisation corticale.

Nous avons vu que le cerveau a la capacité de se réorganiser à la suite d'une lésion, mais est-ce possible d'agir sur cette réorganisation corticale afin d'obtenir une amélioration sur le plan comportemental ? Les auteurs qui ont utilisé par exemple, la déprivation monoculaire (suture d'un œil) chez l'animal ont observé au niveau cortical une dominance des neurones pour l'œil sain et une forte diminution des neurones binoculaires (Hubel et Wiesel, 1963 ; pour revue : Berardi et *al.*, 2000). Ivanko et Greenough (2000) ont montré

que l'influence d'un environnement riche ou d'un apprentissage moteur chez l'animal adulte est accompagnée d'une croissance dendritique. Ces types de changements morphologiques sont également obtenus à la suite d'une lésion cérébrale, suggérant que l'expérience ou la plasticité à la suite d'une lésion partagent des processus communs. En effet la récupération à la suite d'une lésion cérébrale est invariablement prédite par la croissance dendritique au niveau du tissu restant (Kolb et *al.*, 1995). On peut avoir une surcroissance dendritique au niveau de l'hémisphère controlésionnel. Le fait d'utiliser le membre sain au niveau moteur (géré par l'hémisphère sain) va engendrer une dendritisation massive (Figure 71) et par conséquent une activation importante de cet hémisphère qui va mettre sous silence l'hémisphère lésé induisant une activation « mal adaptative » : peu efficace sur le plan fonctionnel.



Figure 71: Représentation des arbres dendritiques des neurones de deux rats, au niveau de la région corticale sensorimotrice péri-lésionnelle. Le rat de gauche peut se servir de sa patte controlatérale à la lésion alors que le rat de droite a sa patte déficitaire mobilisée, par conséquent il ne peut pas s'en servir. (Figure tirée de Schallert, Leasure, Kolb, 2000).

4.3. Techniques de neuromodulation

Malgré la perte de tissus irréversible à la suite d'une lésion cérébrale telle qu'un AVC (dont souffrent la plupart des patients HLH ayant participé aux protocoles présentés dans cette thèse) les patients peuvent donc récupérer certaines fonctions avec le temps. Par exemple dans la littérature il est fréquent d'observer, à la suite d'une lésion des aires motrices de la main, une amélioration fonctionnelle, qui est sous-tendue par l'utilisation de

régions corticales qui n'étaient initialement pas dédiées à l'utilisation de la main, telles que l'aire motrice de l'épaule.

Le principe de la rééducation est de stimuler les aires hypo-actives et d'inhiber les aires hyper-activées du côté de l'hémisphère sain (Hummel et *al.*, 2005). A l'aide de la TMS (stimulation magnétique transcrânienne), qui vise à moduler l'activité cérébrale à l'aide de champs magnétiques, on pourrait arriver à moduler l'activité hémisphérique à la suite d'une lésion, car selon les seuils utilisés on peut soit augmenter l'excitabilité de l'hémisphère lésé ou inhiber l'hémisphère sain (Johansen-berg, 2002). L'effet de médicaments mono-aminérgiques est également un atout pour la réorganisation corticale à la suite d'une lésion cérébrale. Kessler et *al.* (2000) ont montré que la Piracetam permettait un rééquilibrage du déséquilibre hémisphérique. C'est-à-dire que son effet permet à l'hémisphère sain de moins s'activer et inversement pour l'hémisphère lésé. Pariente et *al.* (2001) ont eux montré l'effet bénéfique d'un inhibiteur à la recapture de sérotonine (Prozac®) durant la semaine qui suit la lésion, cette molécule va aller agir au niveau de la lésion et ceci est corrélé avec les performances comportementales qui sont améliorées. L'entraînement a, comme on l'a évoqué précédemment, un effet sur la réorganisation corticale à la suite d'une lésion cérébrale, et sur la récupération de la fonction perdue, au niveau comportemental. Il se produit alors, un changement au niveau des représentations corticales qui peut apparaître de manière très rapide durant l'apprentissage d'une tâche. Ce mécanisme est probablement sous-tendu par des connexions neuronales pré-existantes mais restées jusqu'alors sous silence, résultant de la levée de l'inhibition et de l'augmentation de l'efficacité synaptique des circuits neuronaux existants (Pascual-Leone et *al.*, 1994).

Nous allons présenter dans la partie suivante les différentes techniques de prises en charge possibles à la suite d'une lésion occipitale engendrant une amputation du champ visuel.

Résumé

Plusieurs travaux ont montré qu'une lésion occipitale s'accompagnait d'une réorganisation corticale au sein de l'hémisphère lésé et/ou de l'hémisphère intact. Cependant, l'effet de la latéralisation de la lésion reste peu étudié. Cela est d'autant plus surprenant qu'il a été montré chez le sujet sain que, même si elle est essentiellement visuelle (et favorise *a priori* l'hémisphère droit), la nature de la tâche peut faire apparaître une prédominance de l'hémisphère gauche. Les données de la littérature soulèvent la question d'interactions entre hémisphère lésé, tâche et plasticité corticale. Pour tenter de répondre à ces interrogations, nous avons proposé un protocole en IRMf à 14 participants sains, 3 patients hémianopsiques droit (cérébro-lésés gauche) et 5 patients hémianopsiques gauche (cérébro-lésés droit). Nous avons proposé une tâche avec une consigne de détection (« Une image est-elle présente à l'écran ? ») et une consigne de catégorisation (« Est-ce une image de ville ou d'autoroute à l'écran ? »). Nous observons, chez les participants sains une activation bilatérale lors de la détection et une activation plus latéralisée au niveau de l'hémisphère gauche pour la catégorisation. L'activation au niveau des aires visuelles est bilatérale, chez les patients cérébro-lésés droit, et essentiellement latéralisée à droite chez les patients cérébro-lésés gauche, et ce quelle que soit la consigne. La latéralisation d'une lésion occipitale n'est donc pas sans conséquence sur la nature de la réorganisation corticale qui s'ensuit. Nos résultats mettent également en évidence que le réseau cortical recruté n'est plus spécifique à la nature de la tâche demandée chez ces patients. Ceci soulève la question des limites de la réorganisation corticale mais également du rôle de la spécialisation hémisphérique chez le sujet sain.

CHAPITRE 3 : PRISE EN CHARGE DES AMPUTATIONS DU CHAMP VISUEL D'ORIGINE CEREBRALE

Nous avons vu qu'il était possible d'influencer la réorganisation corticale grâce à des techniques expérimentales de neuromodulation incluant la TMS, et grâce à des traitements pharmacologiques. Nous présentons maintenant de manière très succincte les différentes techniques de prise en charge de l'hémianopsie latérale homonyme et nous tentons d'apporter des réponses quant à la possibilité de restaurer la vision dans le champ aveugle des patients hémianopsiques. Ceci en s'appuyant sur les capacités de *blindsight*, dont font preuve les patients HLH dans le champ visuel aveugle. Enfin, nous aborderons la question suivante : est-ce que l'entraînement du *blindsight* peut modifier les capacités perceptives objectivables par des tests. Nous tenterons d'y répondre à l'aide de résultats présentés sous-forme d'article [Article 4].

I. Réhabilitation des amputations du CV d'origine centrale

1. HLH et récupération spontanée

Avant d'exposer les différents types de rééducation de ce déficit visuel d'origine centrale, il semble important de rappeler que durant les trois premiers mois consécutifs à la lésion, les patients peuvent bénéficier d'une récupération spontanée (phénomène de *diaschisis*), qui reste cependant très limitée (3 à 7°). En effet, la vision peut revenir spontanément chez des patients atteints de lésion rétrochiasmatique uni ou bilatérale (Zhil, 2000) il est cependant très rare que la récupération soit complète (Poppelreuter, 1917), moins de 10% des patients concernés retrouvent leur CV complet selon Pambakian et Kennard (1997). La récupération spontanée est donc possible dans une certaine mesure, mais elle diminue au fur et à mesure du temps écoulé à la suite de la lésion. Selon les études, le taux de récupération peut aller de 7% à 86% (pour revue : Sabel et Kasten, 2000).

Zhang et *al.* (2006) ont réalisé une étude longitudinale sur 15 ans chez des patients hémianopsiques, pour observer la récupération spontanée. Ils ont pu remarquer que dans 38.4% des cas, après un délai de 6 mois après l'apparition de la lésion, l'HLH devient un trouble chronique. Les chances de récupération diminuent avec le temps passé après la lésion : à un mois les chances de récupérer sont supérieures à 50%, alors qu'elles ne sont plus que de 20% à 6 mois. Ils précisent que dans la plupart des cas, la récupération est partielle. Seulement 5.3% des patients récupèrent complètement leur champ visuel. Certains patients adoptent spontanément des stratégies de compensation, concernant particulièrement l'exploration visuelle (Pambakian et *al.*, 2000). Sabel et Kasten (2000) considèrent qu'après un délai de 3 à 6 mois à la suite d'une lésion cérébrale, seul l'entraînement (la rééducation) peut améliorer les capacités visuelles.

Comme nous allons le voir ci-dessous il apparaît donc indispensable de mettre en place une prise en charge des troubles neurovisuels d'origine centrale.

2. Nécessité d'une prise en charge de l'HLH

Les troubles visuels sont fréquents à la suite d'une lésion cérébrale et malheureusement trop peu souvent diagnostiqués et très rarement pris en charge. Alors que les rééducations concernant les troubles du langage et les troubles moteurs sont systématiques et bien connus à la fois par les professionnels et par les patients, les troubles neurovisuels sont eux, trop souvent considérés comme des troubles pour lesquels aucune récupération n'est possible. De plus, les patients souffrant de troubles neurovisuels peuvent présenter : - des signes d'anosognosie (absence de conscience du déficit) ou -peuvent émettre comme plainte un dysfonctionnement de la vue, ressemblant à un trouble ophtalmologique périphérique. C'est pourquoi, les patients sont souvent mal orientés, et peuvent répéter les consultations ophtalmologiques, qui ne trouveront pas de solution à leur trouble visuel, puisque d'origine cérébral. Heureusement, ces dernières années les techniques de prise en charge des troubles visuels dus à une lésion cérébrale se développent. Comme nous l'avons vu lors du chapitre I, le système visuel est représenté de manière très large au niveau cérébral, par conséquent la probabilité que les aires visuelles corticales soient atteintes à la suite d'une lésion est très grande (Zang, 2006 ; Rowe et *al.*, 2009). Selon Kerkhoff, (2000) les troubles visuels d'origine centrale concernent 20 à 50% des patients se trouvant en centre de rééducation neurologique.

Plus surprenant encore, selon d'autres données, 8% seulement des patients sur une cohorte de 323 patients ne présenteraient pas de difficultés visuelles et 49% souffriraient d'une amputation du champ visuel (Rowe et *al.*, 2009). Enfin, selon une étude plus récente 60.5% des patients à la suite d'un AVC souffriraient d'un trouble visuel (Ali, Hazelton, Lyden, Pollock, Brady, 2012). Différents modèles théoriques tentent d'expliquer les mécanismes sous-tendant la part cognitive de la vision (perception visuelle, attention visuo-spatiale, reconnaissance d'objet). Cette multitude de descriptions sémiologiques, d'explications théoriques et de définitions des troubles neurovisuels explique la diversité des techniques de prise en charge, très différentes, qui existent pour rééduquer les troubles neurovisuels, mais aussi les désaccords théoriques. Kerkhoff (2000) a classé ces différentes prises en charges en trois groupes : tout d'abord la méthode par compensation : en général, les amputations du champ visuel sont considérées comme des troubles impossibles à rééduquer. Dans cette optique, les prises en charge se sont axées sur la compensation du trouble en utilisant des fonctions préservées, par exemple Pambakian, Mannan, Hodgson, et Kennard (2004), ont proposé d'entraîner les capacités d'exploration visuelle, c'est-à-dire d'entraîner les patients à bouger les yeux et à chercher rapidement une cible dans le champ visuel. Puis, la seconde méthode, par substitution qui implique une adaptation de l'environnement aux difficultés du patient, telle que le port de lunettes prismatiques par exemple (Perlin, Dziadul, 1991). Enfin la troisième méthode par restauration, est une approche à visée restaurative qui s'oppose aux deux précédentes. Elle fait l'hypothèse que la récupération du champ visuel est possible et que l'on peut restaurer de manière objective le champ visuel « aveugle » des patients HLH (Chokron et *al.*, 2008, Bergsma et Van der Wildt, 2010).

Nous présentons ci-dessous les différentes techniques de rééducation : de compensation et de restauration, visant à améliorer la qualité de la vision chez les patients hémianopsiques et nous présenterons l'intérêt d'utiliser les capacités visuelles résiduelles ou inconscientes pour restaurer le champ visuel. Puis nous aborderons les substrats neuronaux qui sous-tendent la récupération visuelle, à l'aide d'une rapide revue de la littérature concernant les études sur la plasticité cérébrale en neuroimagerie et plus précisément de la plasticité corticale chez les patients hémianopsiques à la suite d'une rééducation. Pour enfin présenter sous forme d'article, l'intérêt d'utiliser les capacités visuelles inconscientes pour restaurer la vision de manière objective au sein du champ « aveugle ».

3. Différentes techniques de rééducation pour l'HLH

Comme nous l'avons évoqué lors du Chapitre 3 de la PARTIE 1, l'HLH est un trouble visuel invisible, mais qui est très invalidant pour la réalisation de tâches quotidiennes telles que la conduite automobile, la lecture, marcher dans la foule, traverser une route... toutes ces difficultés peuvent devenir un réel obstacle à la vie active.

Puisque la récupération spontanée est faible (Zhang et *al.*, 2006), de nombreux programmes de rééducation ont été proposés pour aider les patients. Ces programmes peuvent être classés en deux sous-types de catégories : selon si l'objectif de la prise en charge est de compenser le déficit ou de récupérer, restaurer la vision. Les techniques de compensation prennent en charge la recherche visuelle du côté du champ visuel aveugle (Zihl, 1995). Alors que les techniques à visée restaurative, suggèrent qu'il est possible de retrouver la vision au niveau du champ visuel amputé.

3.1. Techniques de compensation

Ces techniques s'appuient sur l'idée selon laquelle la récupération d'un déficit perceptif est quasiment impossible. C'est pourquoi elles proposent d'utiliser les capacités préservées, et changer la manière dont les patients les utilisent, dans le but de pallier le déficit. Les techniques de compensation pour les patients HLH visent à utiliser le champ visuel intègre ou le champ visuel central pour compenser la perte de vision dans le champ visuel controlatéral. La première technique est d'utiliser des aides optiques (telles que les prismes de Fresnel) afin de déplacer les informations visuelles du champ aveugle aux champs préservés : central ou ipsilésionnel. Cependant les effets positifs de cette méthode restent anecdotiques, et provoquent souvent des pertes d'acuité, des confusions, ou même des diplopies chez les patients (pour revue : Pambakian et Kennard, 1997 ; Rocksmith, Reding, 2002 ; Perlin, Dziadul, 1991). C'est pourquoi cette méthode n'est quasiment plus utilisée. De nos jours, l'objectif des techniques de compensation, concernant la prise en charge de l'hémianopsie est d'élargir le champ d'exploration visuelle en apprenant aux patients des stratégies oculomotrices. En effet, il est bien reporté dans la littérature, que les patients HLH ont des difficultés pour explorer visuellement ce qui engendre des difficultés lors de la détection d'objets, de personnes, des omissions de parties de scène visuelle

parfois cruciales pour leur compréhension, pouvant changer leur sens et même provoquer des incompréhensions dans les relations sociales. Certains auteurs ont montré (Zihl, 2000) que les patients HLH mettent en place spontanément des stratégies afin de compenser leurs gênes : déviation du regard dans le CV amputé, réalisation de nombreuses saccades dans le CV amputé, qui sont trop courtes pour permettre une exploration rapide et organisée, par conséquent ils font preuve d'une exploration visuelle désorganisée et moins précise. Le but de cette rééducation (Pambakian, Mannan, Hodgson, Kennard, 2004) est d'utiliser ces stratégies compensatrices à l'aide d'un entraînement cadré, dans le but d'inciter les patients à mieux explorer visuellement leur environnement. A la suite de cette prise en charge, ils n'observent pas d'amélioration du CV, en revanche, ils observent une amélioration significative du champ d'exploration visuelle (de 4°). Comme nous l'avons déjà évoqué, l'amputation du champ visuel est gênante pour lire, car elle engendre une réduction de la « fenêtre de perception » impliquée lors de la pré-identification des lettres, qui nous permet de lire rapidement et d'anticiper, mais également lors du guidage du mouvements des yeux au niveau du texte (McDonald et *al.*, 2006 ; Zihl, 1995 ; Chedru et *al.*, 1973 ; Poppelreuter, 1971). Généralement, lors de la rééducation oculomotrice, les patients sont entraînés à chercher des cibles présentent dans le champ aveugle, et à les détecter le plus rapidement possible. Les cibles peuvent être présentées seules ou avec des distracteurs, ce qui demande une plus grande charge attentionnelle, et une demande de sélection de l'information visuelle à traiter ainsi qu'un engagement de l'attention au niveau du champ visuel en question (Zihl et Werth, 1984).

Une autre technique, se base sur la stimulation multisensorielle et principalement sur l'intégration multisensorielle (Bolognini, Rasi, Coccia, et Làdavas, 2005 ; Passamonti, Bertini, Làdavas, 2009). Selon les auteurs cette technique ne nécessite pas d'attention de la part du patient. D'où l'intérêt de la proposer aux patients HLH, qui dans certains cas peuvent présenter des troubles attentionnels. Ces auteurs, suggèrent qu'il existe des neurones qui encodent l'information de différentes modalités sensorielles, au niveau des colliculi supérieurs. Du fait que les colliculi supérieurs soient impliqués dans l'orientation du regard, il serait alors possible d'utiliser d'autres sens que la vision qui est déficitaire chez ces patients, comme l'audition par exemple, pour renforcer l'orientation du regard du côté du champ visuel amputé. Ces auteurs, ont utilisé une stimulation visuelle unique et une stimulation mutli-sensorielle : audio-visuelle, afin d'aider les patients à trouver la cible dans leur champ visuel aveugle.

Ils ont pu observer une augmentation de l'exploration oculomotrice lorsque la stimulation auditive est concordante avec la cible visuelle. La stimulation multi-sensorielle permet donc, d'utiliser un sens préservé tel que c'est le cas ici pour l'audition afin d'aider un autre qui est perturbé (tel que la vision dans ce cas) permettant une compensation. Enfin d'autres auteurs, se sont penchés sur la difficulté rencontrée par les patients HLH pour lire, c'est pourquoi ils ont créé une technique provoquant un nystagmus optocinétique, pour faciliter la lecture de ces patients (Spitzyna *et al.*, 2007). Cet outil permet de présenter le texte en mouvement de la droite vers la gauche, induisant comme son nom l'indique, un nystagmus permettant d'augmenter la vitesse de lecture.

Nelles, Esser, Eckstein, Tiede, Gerhard, Diener (2001), Pambakian, Currie, Kennard (2005), ont examiné ces différentes techniques d'entraînement visuel, afin d'évaluer leurs répercussions sur l'amputation du CV, ils n'ont pas observé d'amélioration objective au niveau du CV. Même si ces techniques ne restaurent pas le champ visuel, elles permettent d'améliorer la qualité de vie des patients. Selon les réponses obtenues aux questionnaires subjectifs elles permettent d'améliorer le quotidien des patients (Bolognini *et al.*, 2005, Kerkhoff, Schaub, Zihl, 1990).

Comme nous l'avons précisé, ces techniques permettent de compenser le trouble, cependant les difficultés visuelles persistent. Elles n'abordent pas vraiment la récupération du champ visuel en tant que telle. De plus, il a été montré que le champ visuel sain considéré comme parfaitement intact, peut également être perturbé, non pas en terme de perte de champ visuel mais en perte de qualité de vision (Paramei et Sabel, 2008). Ainsi, les techniques s'appuyant uniquement sur le champ visuel « intact » ne sont probablement pas une bonne alternative pour la rééducation. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en charge directement le champ visuel aveugle et d'essayer de le restaurer. Nous allons présenter dans la partie suivante les techniques récentes abordant ce point, de rééducation ayant pour objectif d'améliorer le champ visuel aveugle.

3.2. Techniques de restauration

La tentative de restaurer les capacités visuelles dans le champ visuel aveugle est une approche relativement récente, et toujours très controversée. Cependant, elle apparaît comme une manière très encourageante d'aider les patients hémianopsiques. Mais malheureusement, comme nous l'avons évoqué précédemment la récupération chez ces patients semble quasiment impossible. Effectivement le cortex visuel primaire V1 est la base de la vision consciente, restaurer la vision chez les patients HLH à la suite d'une lésion d'origine cérébrale, sans l'intégrité de cette région lésée (V1) semble impossible sans l'implication de la plasticité cérébrale comme le renforcement d'un circuit neuronal préexistant ou la création de nouvelles connections synaptiques qui selon les études sur le sujet, prendrait forme durant les trois premiers mois à la suite de la lésion. Par ailleurs, si cette réorganisation existe, il n'est pas certain qu'elle puisse prendre en charge une activation assez importante permettant au patient d'accéder de nouveau à une perception consciente au niveau du champ aveugle. Néanmoins, certains auteurs suggèrent qu'il est possible de gagner en champ visuel, donc de récupérer une vision consciente au niveau du champ aveugle. Nous présentons ci-après de manière succincte les différentes études abordant ce sujet.

3.2.1. Techniques de rééducation : oculomotrice

La plupart des études se sont inspirées des techniques compensatrices, c'est pourquoi certains auteurs ont entraîné les patients HLH à élaborer des saccades dans le champ visuel dans le but de compenser l'amputation du champ visuel par de grandes saccades du côté du champ amputé. De cette manière, ils sont aperçus, que cela pouvait partiellement agrandir la taille du champ visuel lui-même et pas seulement le champ d'exploration visuel (Zihl 1981, Van der Wildt et Bergsma, 1997). L'étude chez le singe menée par Mohler et Wurtz (1977) constitue la première tentative de rééducation de ce type. L'entraînement consiste à diriger des saccades oculaires vers des cibles à détecter et à localiser dans le CV amputé. Les résultats mettent en évidence une récupération de la partie du champ visuel ayant fait l'objet d'un entraînement spécifique. Zihl et Von Cramon (1979, 1980, 1985) ont adapté ce type de rééducation chez des patients HLH.

Cet entraînement consiste à détecter des cibles visuelles placées à la frontière du CV voyant et du CV aveugle (Zihl et Von Cramon, 1979). Ils observent une amélioration de la sensibilité au contraste, de l'acuité visuelle et de la perception des couleurs dans la partie du CV stimulé, ceci a été également observé par Kerkhoff (1995) chez 22 patients hémianopsiques. Dans une autre étude, Zihl (1995) met en évidence les difficultés d'exploration visuo-spatiale que présentent les patients hémianopsiques. Il remarque que ces patients présentent un comportement oculomoteur moins régulier, moins précis, et font de nombreuses fixations, lorsqu'il s'agit de diriger des saccades en direction du CV amputé. Par conséquent ces patients ont une exploration visuelle désorganisée, irrégulière et très coûteuse attentionnellement. Il leur propose alors un entraînement ciblé sur la recherche visuelle, qui consiste à fixer un point central et d'aller chercher avec un mouvement oculaire rapide et précis une cible visuelle (ce mouvement de balayage doit se faire en une seule saccade). Les résultats observés mettent en évidence une amélioration considérable de l'exploration visuelle chez les patients HLH, de plus ils constatent une amélioration du CV de 16 degrés en moyenne au bout de 17 séances d'entraînement (Zihl et Von Cramon, 1985) et de 5 degrés dans l'étude de Zihl en 2000.

Ces résultats aussi optimistes que surprenant, ont permis de développer par la suite un outil d'entraînement facile à utiliser par les patients, appelé VRT (Visual Restoration Therapy : rééducation visuelle à visée restaurative) (Kasten et *al.*, 1999 ; Sabel et Kasten 2000). Les patients peuvent s'entraîner au quotidien, à leur domicile, sur leur écran de télévision, avec un programme informatisé élaboré en fonction de leurs capacités visuelles, qui s'adapte à leur progrès. Durant les sessions d'entraînement, les patients doivent fixer leur regard au centre de l'écran, et s'exercer à détecter des cibles placées au niveau de la zone frontière de leur champ aveugle, en appuyant sur un bouton dès qu'ils perçoivent la cible (Kasten Buzental et Sabel, 2006). Ils ont pu observer une amélioration partielle du champ visuel, différente selon les études : par exemple Kasten Buzental et Sabel (2006) ont entraîné 15 patients durant trois mois à l'aide du programme VRT, ils ont observé une amélioration de la détection des cibles présentées dans le champ aveugle, de seulement 3,8%. Dans une étude un peu plus récente, chez 302 patients qui ont suivis le programme VRT durant 6 mois, Mueller, Mast et Sabel (2007) ont pu constater une amélioration de 17,2% de détection correcte, des stimuli présentés dans le champ aveugle, bien que 29,1 % des patients ayant participé à cette étude n'aient pas bénéficié d'amélioration significative. Cependant, l'amélioration du champ visuel s'étend à une moyenne de $4.9 \pm 0.41^\circ$.

De plus, selon un questionnaire permettant de qualifier et quantifier de manière subjective l'amélioration visuelle à la suite du programme de rééducation, 75.4% sentent une amélioration.

Globalement, ces auteurs ont été critiqués du fait d'un engagement des patients sur un long terme et un entraînement fastidieux pour de très faibles résultats (Glisson et Galetta, 2007). Horton (2005) a expliqué que les patients montraient principalement une amélioration subjective, et que l'amélioration pouvait s'observer sur le matériel avec lequel les patients étaient entraînés mais pas à l'aide d'une périmétrie automatisée classique.

Un autre outil de rééducation a été créé par Schmielau, appelé Lubeck Reaction Perimeter. Schmielau et Wong (2007) ont testé cet outil chez 20 patients et ont obtenu des résultats très intéressants : les patients ont été entraînés deux fois par semaine, sur une durée moyenne de 8,2 mois. Durant l'entraînement, ils étaient assis face à une grande demi-sphère pleine de petites lumières (LED) (Figure 72) qui s'éclairent selon les capacités visuelles de chaque patient, comme pour le programme VRT abordé précédemment. La consigne était de fixer une LED rouge placée au centre de la sphère durant la phase test. Ils ont constaté une amélioration significative du taux de détection des cibles situées en moyenne jusqu'à $11.3^{\circ} \pm 8.1$ dans le champ visuel aveugle (chez 17 patients sur 20 au total). Cependant la taille du matériel est importante et son installation aussi, par conséquent il est difficilement utilisable à domicile pour un entraînement quotidien (Sabel 2008).



Figure 72 : Outil de rééducation mis au point par Schmielau et Wong (2007) appelé *Lubeck Reaction Perimeter*.

3.2.2. Techniques de rééducation : utilisation du *blindsight*

Une approche très différente de celles abordées précédemment, se base sur les travaux de recherches centrés sur les capacités de traitement visuel inconscientes dans le champ aveugle des patients HLH appelé *blindsight* (Cf chapitre 3 PARTIE 1) (Weiskrantz 1974). Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, certains patients hémianopsiques ont la capacité de réaliser des tâches visuelles dans leur champ aveugle alors qu'ils n'ont aucune conscience de la présence des stimuli. Bien que l'utilisation du *blindsight* ne soit pas abordée comme une possibilité de récupérer d'une perte visuelle d'origine corticale, quelques auteurs suggèrent qu'il est possible d'améliorer les capacités de vision inconscientes (*blindsight*) (Trevethan, Sahraie et Weiskrantz, 2006).

Par conséquent, il semble être possible de rendre cette vision inconsciente, consciente (Ro et Rafal, 2006). Pouvons-nous, alors, utiliser le *blindsight* comme support pour entraîner les patients hémianopsiques à revoir dans leur champ visuel aveugle ?

Avant d'aborder de manière plus détaillée les études ayant utilisé le *blindsight* pour restaurer la vision dans le champ aveugle des patients HLH il semble primordial de présenter les études qui se sont intéressées aux capacités inconscientes/implicites et ce dans différents champs de la neuropsychologie.

4. Peut-on utiliser les capacités inconscientes des patients, comme support de rééducation en neuropsychologie ?

La question se pose car effectivement dans la littérature il est évoqué que l'être humain peut acquérir et utiliser des connaissances, à partir de capacités inconscientes et de manière inconsciente. Les études menées sur ce sujet utilisant des mesures objectives tendent à répondre que non, qu'il n'est pas possible d'utiliser des capacités inconscientes (Shanks, 2005), alors que d'autres utilisant des mesures subjectives tendent à accepter l'existence de connaissances inconscientes, implicites (Dienes et Perner, 1999). Les capacités inconscientes sont marquées par le fait que les participants pensent ne pas savoir, ou ne peuvent pas faire la différence entre la situation où « ils savent quelque chose » et celle où « ils devinent ». Les connaissances explicites font référence à une connaissance qui s'exprime de manière consciente, on se souvient de ce dont on se rappelle, c'est-à-dire qu'on se souvient d'avoir appris cette connaissance et on est conscient de la rappeler. Alors que les connaissances implicites font référence à des connaissances acquises et rappelées sans conscience, non-intentionnelles, on « sait » mais on ne sait pas que l'on sait. Mais, d'un point de vue méthodologique il est très difficile de tester de manière isolée un seul des ces processus (explicite ou implicite) car ils sont très finement intriqués (Smith et *al.*, 2006). D'autant plus que certains auteurs ont mis en évidence des mécanismes moléculaires communs à la mémoire implicite et explicite (Barco et *al.*, 2006), cependant cette interaction (explicite/implicite) est encore peu ou mal comprise (Forkstam, 2005).

Schacter s'est posé la question suivante : « comment un patient peut avoir mémorisé sans se souvenir ou comment il peut percevoir sans perception ? “*How can a patient exhibit memory without remembering or perception without perceiving?*” (Schacter, 1992).

Pour la mémoire un paradigme très fiable et très connu est utilisé pour mettre en évidence ces deux processus (explicite vs implicite) le paradigme RK (R : Remembering, K : Knowing) se rappeler, se souvenir (mémoire épisodique) et savoir, avoir connaissance (mémoire sémantique) (Dunn, 2004). Les corrélats anatomiques sous-tendants ces deux processus sont distincts (Wheeler, Buckner, 2004). Une approche neuropsychologique a permis de mettre en exergue ces deux processus, chez des patients amnésiques. L'amnésie est un trouble de la mémoire qui se caractérise en général par l'incapacité à se rappeler d'épisodes récents, avec une perception et une intelligence normale. Le patient amnésique HM décrit par Milner (2005) présentait un déficit sévère pour se rappeler de faits récents [par exemple : ce qu'il avait fait 5 minutes avant, ce qu'il avait mangé lors du repas précédent...]. Cependant sa mémoire implicite était parfaitement intègre (Milner, 2005). Ce qui conforte l'idée que les processus implicites et explicites sont distincts. En parallèle avec ces études sur la mémoire implicite chez les patients amnésiques, des études chez des patients souffrant de troubles visuels ont été menées pour étudier le phénomène de *blindsight*. Poppel et al. (1973) fut le premier à décrire ce phénomène (*Cf chapitre sur le blindsight*). De même que pour la négligence spatiale unilatérale il a été montré des capacités implicites préservées. De même que pour l'agnosie visuelle (trouble de la reconnaissance visuelle) il a été décrit ce même genre de dichotomie entre une connaissance explicite et implicite. En effet, Behrmann et al. (2005) : ont décrit un patient agnosique : S.M. qu'ils ont entraîné à reconnaître des objets (« *greebles* »). Les performances de ce patient s'améliorent pour la reconnaissance de ce type d'objets (les *greebles*). De plus il est capable de discriminer des objets qu'il n'avait pas appris durant la phase d'apprentissage, ce qui montre que cette capacité peut se généraliser. Cependant, l'entraînement à la reconnaissance de nouveaux objets chez des patients agnosiques est très discuté, en effet Caldara et al., (2005) n'ont pas observé cet effet d'apprentissage chez leur patient. La question que nous abordons maintenant est la suivante : dans le *blindsight*, cette perception sans conscience implique t'elle des connaissances implicites ? Est-ce que le *blindsight* peut être un support pour un apprentissage ?

4.1. Peut-on restaurer la vision chez les patients HLH en utilisant les capacités de *blindsight* ?

Les caractéristiques de la tâche utilisée ont évidemment un impact important sur la récupération de la fonction perdue. De nombreuses études ont mis en évidence que la

plasticité perceptive est liée à la demande attentionnelle de la tâche (Karni et Sagi, 1993). Cependant d'autres études ont observé que le système visuel pouvait s'adapter à des stimuli subliminaux, donc perçus non consciemment, sans demande attentionnelle. La seule condition qui doit être respectée est la présentation synchrone entre le stimulus subliminal et une autre tâche qui demande un focus attentionnel (Seitz, Watanabe, 2003). Contrairement à une perte de la vision due à une lésion périphérique, la vision à la suite d'une lésion de V1 n'est pas complètement abolie dans la partie du champ visuel amputé (présenté au chapitre 3) (e.g. Morland et al., 1999 ; Pöppel, Held, et Frost, 1973 ; Riddoch, 1917). En effet de nombreux patients souffrant de lésion de V1 font preuve de capacités visuelles résiduelles dans leur champ visuel aveugle, pour la perception du mouvement, des formes, des couleurs (Blythe, Kennard, Ruddock, 1987 ; Weiskrantz, Harlow, et Barbur, 1991 ; Zeki et Ffytche, 1998).

L'étude princeps dans ce domaine a été menée par Blanche Ducarne et Martine Barbeau (1981, 1993) qui ont souligné l'intérêt de stimuler le champ aveugle en utilisant des tâches de localisation et de détection de cibles visuelles prégnantes associée à des gestes de préhension. En effet, l'action motrice dans le CV amputé permet de renforcer la perception visuelle (Danckert et al., 2003). Le patient « réapprend » à voir. *« Cette approche est très intéressante d'un point de vue cognitif, car la vision est vue comme un processus actif de perception, pouvant être généré par l'intégration d'informations multiples et diverses qui se combinent aux capacités visuelles résiduelles implicites »* Chokron, 1998. Trois études menées chez des patients hémianopsiques ont visé à évaluer l'effet d'un entraînement sur les capacités visuelles, avec chacune un système différent (Huxlin, Pasternak, 2004 ; Raninen, Vanni, Hyvärinen et Näsänen, 2006). Ils ont mesuré l'amélioration de la sensibilité visuelle pour des cibles présentées dans le champ visuel aveugle. Raninen et al. (2006) ont entraîné deux patients, durant un an, à une tâche de détection de cible lumineuse puis à une tâche d'identification de lettres, les cibles étaient flashées à 10 ou 30° d'angle visuel du milieu de l'écran. Les améliorations des performances comportementales des patients sont corroborées par les données obtenues en MEG (Raninen et al., 2006) et en IRMf (Henriksson et al., 2007) qui mettent en évidence une activité cérébrale au niveau des aires visuelles non lésées. Sahraie et al. (2006) ont entraîné un patient HLH à l'aide d'une tâche en choix forcé, à discriminer des ondes sinusoïdales d'un fond uniforme. Les performances de ce patient se sont améliorées et ceci ne peut pas s'expliquer par des

mouvements oculomoteurs du côté du champ aveugle car ils étaient contrôlés. Par conséquent on peut se poser la question quant à l'utilisation du *blindsight* dans l'hémichamp aveugle des patients hémianopsiques pour une rééducation appropriée, car en effet elle regroupe deux principes qui semblent fondamentaux pour une récupération fonctionnelle : la stimulation dans le champ visuel déficitaire qui stimulerait l'hémisphère lésé et permettant une balance inter- hémisphérique au niveau de l'activation cérébrale ; ainsi que l'utilisation d'une capacité visuelle inconsciente mais comme on vient de l'évoquer malgré le caractère subliminal des cibles visuelles utilisées, une plasticité est possible. Fine et Jacobs (2002) ont observé chez l'humain, des capacités d'apprentissage plus importantes lorsqu'un bruit extérieur est ajouté aux stimuli à traiter, supposant que les aires visuelles de plus haut niveau permettent cette plasticité. Ou ceci pourrait s'expliquer par le fait que lors d'une tâche précise le focus attentionnel peut être augmenté par des distracteurs qui doivent être inhibés pour la réalisation de la tâche en cours.

4.2. Réorganisation corticale à la suite d'une lésion, dans le cas d'une récupération comportementale

Lorsqu'on évoque la réorganisation corticale la question qui émerge est la suivante : est-ce que la récupération induit de nouvelles connexions, un nouveau réseau ? Ou est-ce que ces changements de fonctions découlent du recrutement d'un réseau déjà existant qui va assumer la fonction de la région lésée, ou est-ce les deux ?

L'étude du *blindsight* nous permet de vérifier, en l'absence de cortex visuel primaire, si les capacités visuelles résiduelles préservées ou les capacités visuelles récupérées naissent de l'existence d'un réseau neuronal déjà existant ou si elles viennent de la formation d'un nouveau réseau. Marshall et *al.* (2008) ont réalisé chez l'humain une expérience en IRMf afin de montrer l'impact d'un entraînement visuel chez des patients hémianopsiques sur la réponse neuronale. Ils ont entraîné les patients durant un mois, puis à la suite de l'entraînement ils ont stimulé les patients dans l'IRMf au niveau de la zone « frontière » du champ (entre le champ voyant et le champ aveugle) qui avait été stimulé durant le mois d'apprentissage, ainsi que la zone du champ voyant (elle non stimulée durant la phase d'apprentissage). Ils ont observé une augmentation du signal BOLD pour la détection dans la zone « frontière » des patients qui correspondait alors à une zone perçue du champ visuel à la suite de la phase d'entraînement. De plus ils ont mis en évidence une corrélation

intéressante, entre les données comportementales des patients obtenues en dehors de l'IRM qui révélait une amélioration des temps de réponse pour détecter les stimuli au niveau de la zone « frontière ». Le cortex temporal droit inférieur et latéral, le cortex frontal droit dorso-latéral, le gyrus cingulaire antérieur et les ganglions de la base de manière bilatérale, montraient une activation plus soutenue. Les auteurs ont conclu que l'entraînement visuel engendre un déplacement de l'attention du champ voyant non entraîné vers la zone frontière entraînée. Ceci semble véhiculé par les régions frontales et d'autres régions visuelles de haut niveau telles que le cortex extra-strié et temporal. De même que Henriksson et *al.*, 2006 ont observé à l'aide de l'IRMf que le traitement de l'information visuelle (provenant des deux champs visuels) s'effectue au sein de l'hémisphère sain à la suite d'un entraînement. Celui-ci permet donc une réorganisation corticale, l'hémisphère sain développe alors une représentation à la fois du champ visuel controlatéral mais également une représentation du champ visuel ipsilatéral principalement au niveau de V5.

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment Bridges et *al.* (2008) (à l'aide de la DTI) et Silvanto, Walsh et Cowey (2009) (à l'aide de la TMS) ont observé chez les patients HLH des réseaux spécifiques qui n'existent pas chez les sujets sains. Ils conclurent donc qu'à la suite d'une lésion cérébrale de nouvelles connexions neuronales se créent. Dans la même optique des travaux récents essaient de comprendre le phénomène neurologique qui permet l'entraînement du *blindsight*. Ils ont observé une réorganisation corticale à la suite d'une utilisation intensive du *blindsight* (Henrikson, Raninen, Näsänen, Hyvärinen et Vanin, 2006). Ces auteurs ont notamment montré une utilisation des aires cérébrales controlésionnelles, et du cortex visuel primaire sain lors de la stimulation du champ visuel aveugle avec des damiers en noir et blanc. Nelles et *al.* (2007) ont également étudié les activations cérébrales pour des stimuli visuels, chez 13 patients hémianopsiques. Alors qu'une stimulation dans l'hémichamp ipsilésionnel entraîne des activations identiques à celles des sujets sains (à savoir une activation du cortex visuel primaire controlatéral, et du cortex extra-strié bilatéral), un schéma d'activation différent est observé pour une stimulation de l'hémichamp aveugle. Ainsi, les auteurs ont mis en évidence des activations bilatérales du cortex extra-strié, mais majoritaires dans l'hémisphère sain. De plus, Raninen, Vanni, Hyvärinen et Näsänen (2007) ont montré qu'il est possible de renforcer les capacités de *blindsight* pour des stimuli clignotants.

Deux patients ont été entraînés, deux fois par semaines pendant un an, à détecter des

stimuli clignotants à 30° d'excentricité, et à reconnaître des lettres clignotantes à 10° d'excentricité. Les performances dans le champ aveugle ont progressé jusqu'à atteindre un degré d'exactitude égal à celui du champ visuel sain. Parallèlement, de nouvelles activations cérébrales sont apparues soit dans les aires extra-striées ipsilésionnelles chez un patient, soit dans le cortex visuel primaire sain chez un autre patient. En revanche, aucune amélioration n'a été retrouvée au niveau de l'évaluation campimétrique (Goldmann). Ces résultats vont dans le sens d'une hypothèse de réorganisation et de plasticité cérébrale à la suite d'une lésion occipitale, mais sans réelle incidence sur le plan fonctionnel.

Nelles et *al.* (2007) précédemment décrit, ont montré qu'une stimulation dans le champ visuel aveugle engendre une activation bilatérale chez les patients HLH au niveau des aires extra-striées mais l'activation est plus importante au niveau de l'hémisphère ipsilatérale à la stimulation, c'est-à-dire que l'hémisphère sain prend le relais de l'hémisphère lésé. Ce résultat va dans le sens de l'hypothèse sur la réorganisation corticale selon laquelle il y aurait un transfert d'activation de l'hémisphère lésé à l'hémisphère sain. Cependant dans cette étude les auteurs n'ont pas tenu compte de la latéralisation de la lésion des patients, et ont moyenné toutes les activations en « *switchant* » les cerveaux des patients afin d'obtenir toutes les lésions du même côté pour tous les patients. Par conséquent il semble délicat de porter des conclusions avec une telle méthode, du fait de la spécialisation hémisphérique, et notamment comme présenté précédemment, nous savons que ce phénomène prend place dès les aires visuelles de bas niveau. C'est pourquoi il nous a semblé important d'envisager et de comparer la réorganisation corticale chez des patients HLH souffrant d'une lésion occipitale droite ou gauche, en considérant l'effet de la latéralisation de la lésion.

4.3. Substrats neuronaux impliqués lors de la récupération

Néanmoins, une question reste en suspend : comment ces changements prennent place et où prennent-ils forme au niveau cortical, quels sont les substrats neuronaux permettant cela ?

De nombreuses techniques en neuroimagerie (fMRI, TMS, DTI, EEG, MEG) ont été utilisées dans le but de comprendre les mécanismes neuronaux sous-tendant ce phénomène de *blindsight* (Cf partie précédente sur les substrats anatomiques du *blindsight*) mais également pour essayer de répondre à la question de la plasticité cérébrale et de la récupération des fonctions visuelles. Ro et Rafal (2006) estiment que le phénomène de

blindsight donne des perspectives cruciales dans la rééducation de l'HLH. De fait, Trevethan, Sahraie et Weiskrantz (2007) ont montré que les capacités de détection, dans le champ visuel aveugle peuvent même être supérieures à celles du champ sain, pour certains stimuli. Ro et Rafal (2006) soutiennent également l'hypothèse selon laquelle le *blindsight* serait sous-tendu par les voies rétino-tectales chez le singe, ce qui correspond à la voie rétino-colliculo-pulvinaire qui projette vers le cortex extra-strié. Il serait possible de renforcer ces voies, qui sont généralement préservées chez les patients hémianopsiques, et donc de renforcer le *blindsight*.

Des études ont mis en évidence qu'un entraînement visuel peut induire une modification neuronale au niveau de V1 (Furmanski et *al.*, 2004 ; Maertens et Poolman, 2005). Safran et Landis (1999) suggèrent que chez l'adulte la carte corticale n'est pas fixée. La plasticité est cruciale pour un ajustement normal du cerveau à toutes les modifications environnementales ainsi que pour améliorer les capacités perceptives. Celle-ci joue également un rôle très important dans la récupération d'une lésion du système visuel. Les études sur la plasticité cérébrale ont montré que le cerveau peut réagir à des stimulations venant de l'extérieur même après une lésion, à la fois dans l'enfance mais aussi à l'âge adulte et même chez les personnes âgées. Par exemple à la suite d'un déficit moteur une partie des aires adjacentes à la lésion peut remplacer et prendre le rôle de l'aire lésée (Liepert et *al.*, 2000), ou l'hémisphère sain peut se réorganiser et s'emparer de la fonction dont était responsable l'hémisphère lésé (Johansen-Berg et *al.*, 2002 ; Rossini et Dal Forno, 2004).

Résumé

Les troubles visuels, fréquents à la suite d'une lésion cérébrale sont malheureusement trop peu souvent diagnostiqués et très rarement pris en charge. Il existe cependant, des techniques de rééducation à la fois de compensation et de restauration. Les techniques de compensation pour les patients HLH visent à utiliser le champ visuel intègre ou le champ visuel central pour compenser la perte de vision dans le champ visuel controlatéral. Les techniques de restauration visent à rétablir les capacités visuelles dans le champ aveugle des patients. Elles restent cependant très controversées. Certains auteurs ont entraîné les patients HLH à élaborer des saccades dans le champ visuel pour compenser l'amputation du champ visuel. De cette manière, ils se sont aperçus, que cela pouvait partiellement

agrandir la taille du champ visuel lui-même. Toujours dans un objectif de restauration, certains auteurs ont souligné l'intérêt de stimuler le champ aveugle en utilisant comme support les capacités de *blindsight* (capacités visuelles inconscientes). En neuropsychologie diverses méthodes de rééducation, utilisent les capacités implicites, quelle que soit la fonction cognitive à prendre en charge (mémoire, reconnaissance..). L'amélioration des performances sous-entend une certaine réorganisation corticale. En effet certains auteurs ont observé à l'aide de l'IRMf, de nouvelles activations cérébrales chez les patients soit au niveau des aires extra-striées ipsilésionnelles, soit au niveau du cortex visuel primaire sain. Mais il est difficile d'en tirer des généralités car ces études sont réalisées sur un très petit échantillonnage. Cependant la plupart des études ont observé une réorganisation corticale à la suite d'un entraînement visuel intensif au sein du champ aveugle, mais sans réelle amélioration comportementale objectivable (les campimétries ne mettent pas d'amélioration en évidence).

La question que nous nous posons dès à présent est la suivante : peut-on restaurer le champ visuel à la suite d'une atteinte occipitale ? Pour répondre à cette question nous avons donc proposé à des patients HLH une tâche comportementale évaluant leurs capacités de détection et de reconnaissance dans leur hémichamp aveugle, avant et après un entraînement intensif engendrant une récupération significative au niveau de leur champ visuel évalué par une périmétrie automatisée. Nous présentons cette étude ci-après sous forme d'article [Article 4].

Objectifs de l'étude

Les troubles visuels sont fréquents à la suite d'une lésion rétro-chiasmatique et rarement pris en charge car considérés comme irréversibles. Cette étude a pour but d'évaluer si l'entraînement des capacités visuelles implicites au niveau du champ aveugle appelées *blindsight*, peut induire une restauration de la vision consciente chez les patients hémianopsiques à la suite d'une lésion occipitale d'origine vasculaire acquise depuis plus de 6 mois.

Article 4

From blindsight to sight: Cognitive rehabilitation of visual field defects

Sylvie Chokron^{a,b,c,*}, Celine Perez^{a,b,c}, Michaël Obadia^{b,c}, Isabelle Gaudry^{a,b}, Laurent Laloum^d and Olivier Gout^{b,c}

^aLaboratoire de Psychologie et NeuroCognition, CNRS, UMR5105, UPMF, Grenoble, France

^bERT TREAT VISION, Fondation Ophtalmologique Rothschild, Paris, France

^cService de Neurologie, Fondation Ophtalmologique Rothschild, Paris, France

^dService d'Ophtalmologie, Centre National Hospitalier des Quinze-Vingt, Paris, France

Abstract. *Purpose:* Traditionally, post-chiasmatic lesions were believed to result in complete and permanent visual loss in the topographically related areas of the visual field. However, a number of studies with monkeys, and later with humans, have demonstrated spared implicit visual functioning, referred to as 'blindsight'. The present study assessed whether training this phenomenon would induce an objective restoration of conscious vision in the blind field of hemianopic patients.

Methods: For a period of 22 weeks nine patients with unilateral occipital damage participated in several forced-choice visual tasks known to elicit blindsight: pointing to visual targets, letter recognition, visual comparison between the two hemifields, target localization, and letter identification. Before and after rehabilitation, patients were submitted to a behavioral pre- and post-test, including visual detection and letter identification as well as to automated perimetry visual field testing (Humphrey Automated 24-2 Full Threshold).

Results: An objective improvement was found in the behavioral tasks for all patients at the post-test stage as well as an objective enlargement of the contralesional visual field for all except one of the nine patients. An overall decrease is seen in the number of undetected points (out of 30) on automated perimetry visual field testing after rehabilitation ($F(1, 16) = 22.57$; $p < 0.001$) for both eyes (Right Eye, RE: $T = 0$; $z = 2.52$; $p < 0.05$; Left Eye, LE: $T = 0$, $z = 2.37$; $p < 0.05$) regardless of lesion side.

Conclusions: The results suggest that explicit (conscious) visual detection can be restored in the blind visual field by using implicit (unconscious) visual capacities. Results are discussed regarding visual field defect rehabilitation, blindsight, attention, and brain plasticity hypotheses.

1. Introduction

Unilateral post-chiasmatic injuries can cause visual defects in both monocular hemifields contralateral to the site of injury. Following unilateral occipital damage of the primary visual cortex one of the more common visual field defects observed is Homonymous Hemianopia (HH), which refers to a meticulously symmetrical loss of vision in the two eyes (see Zihl, 2000 for review). It has been known for some time that vision can

occasionally improve spontaneously in some patients with uni- and bilateral postchiasmatic injury. However, as pointed out by Pambakian and co-workers, there is a poor prognosis for spontaneous recovery of field defects of vascular origin and the degree of recovery depends on the underlying pathology (Pambakian et al., 2005; Pambakian & Kennard, 1997). According to these authors, maximal recovery of a partial defect occurs within the initial 48 hours. Any recovery of a complete hemianopia occurs within the first 10 days, after which complete recovery is unlikely. A review of the literature demonstrates that less than 10% of patients recover their full field of vision (Zhang et al., 2006; Zihl, 2000). However, more recently, in the largest follow-up study ever conducted on HH ($n =$

*Corresponding author: Dr. Sylvie Chokron, Equipe TREAT Vision, Service de Neurologie, Fondation Ophtalmologique Rothschild, 25, rue Manin, 75019 Paris, France. E-mail: chokron@ext.jussieu.fr.

254). Zhang et al. (2006) showed that the probability of spontaneous improvement of HH is related to the timing of the patient's first evaluation, suggesting that greatest HH recovery occurs within the first weeks after cerebral injury. According to Pambakian & Kennard (1997), the extent of visual recovery correlates negatively with age, a history of diabetes or hypertension, and the presence of cognitive, language, or memory impairment.

Due to its poor recovery rate, hemianopia has been considered as a definitive and irreversible loss of vision, even though it has been demonstrated that adapted training programs may induce some visual field recovery (Pambakian et al., 2005; Zihl, 2000). Over the past 40 years, several research groups have set out to determine whether patients with hemianopia have the ability to compensate for their field defect using eye movements, head movements, and extrastriate vision. Consistent with animal studies (Cowey, 1967; Mohler & Wurtz, 1977), it has been demonstrated that in humans the detection of light stimuli presented at the border of the blind visual field (Zihl & von Cramon, 1979) or the direction of saccades towards the border zone of the anopic field region is able to induce a recovery in some but not all patients (Jack et al., 2006; Van der Wildt & Bergsma, 1997; Zihl, 1981). Interestingly, as seen in monkeys, recovery was mainly observed in the portion of the visual field subjected to practice (Zihl, 2000). In the same vein, "Vision Restoration Therapy" (VRT) (Kasten & Sabel, 1995; Kasten et al., 2006; Kasten et al., 2001; Kasten et al., 1999; Kasten et al., 1998; Kasten et al., 1998; Sabel & Kasten, 2000; Mueller et al., 2007; Sabel et al., 2005 for review) is a computerized visual detection training program, which runs on personal computers and is carried out at the patients' home. VRT projects stimuli in the border areas of the hemianopic field (transition zone or borderzone), such as partially defective areas located typically between the intact and the blind regions of the visual field. Patients press a key on the keyboard whenever they detect the stimulus presented in or near the borderzone. The patients perform the training exercises twice daily for half an hour each during a six month period. Recently, six chronic, right hemianopic patients underwent functional magnetic resonance imaging (fMRI) while responding to stimuli in the trained visual border zone versus the non-trained seeing field before and after one month of VRT (Marshall et al., 2008). There was a significant increase in BOLD activity for border zone detection relative to detection in the seeing field after the first month of therapy, which correlated with a

relative improvement in response times in the border zone location on behavioral tasks performed without imaging.

The authors concluded that VRT appears to induce an alteration in brain activity associated with a shift of attention from the non-trained seeing field to the trained border zone. The effect appears to be mediated by the anterior cingulate and dorsolateral frontal cortex in conjunction with other higher order visual areas in the occipitotemporal and middle temporal regions.

Other training techniques aim at systematically reinforcing compensatory oculomotor strategies, thereby fortifying and enlarging the field of search. Based on observations of hemianopic patients' oculomotor scanning behavior (Zihl, 1995), Zihl and co-workers developed a two-stage treatment method (see Zihl, 2000 for review). In the first stage, the use of large saccadic eye movements was used to enlarge patients' field of search and to help them gain information as to where stimuli are located within a given spatial framework. In the second stage, patients learned to improve their scanning strategy, especially regarding spatial organization. Importantly, the authors note that the magnitude of gain was independent of other variables, such as etiology, time since lesion, type of field defect, field sparing, and patient age.

Given the difficulty in predicting visual field recovery and the very low interest in experimentally rehabilitating vision in hemianopic patients, there is limited research in the rehabilitation of hemianopia compared to both unilateral spatial neglect rehabilitation or 'blindsight' studies (see Chokron et al., 2007 for review). 'Blindsight' refers to the preservation of some unconscious visual processing in these patients' anopic field. Traditionally, geniculostriate lesions were considered to result in complete and permanent visual loss in the topographically related area of the visual field (Holmes, 1918; Huber, 1992). However, a number of studies with monkeys, and later with humans, have demonstrated that despite destruction of the striate cortex, or even hemispherectomy, some patients retain certain visual function (Cowey & Stoerig, 1995; 1997; 2004; Goodall, 1957; Humphrey & Weiskrantz, 1967; Perenin & Jeannerod, 1975; Stoerig, 2006; Ukei, 1966; Weiskrantz, 2004). Weiskrantz, Warrington, Sanders and Marshall (1974) initially documented this intriguing phenomenon in their famous case, DB (see also Weiskrantz, 1986; 1996 for discussion). DB exhibited a relatively preserved ability to point to stimulus locations, detect movement and discriminate the orientation of lines, gratings and letters, despite his denial of

seeing the stimuli. This preservation of unconscious visual abilities in the blind hemifield is now usually referred to as blindsight. There are two types of blindsight. Specifically, Type 1 blindsight refers to the persistence of visual capacities in the absence of acknowledged awareness by the patient; whereas, Type 2 blindsight is used to characterize such capacities with impaired awareness of the stimulus presence (Weiskrantz, 2004). In addition, regarding motion detection in the blind visual field, the Riddoch phenomenon refers to the preserved ability of hemianopic patients to detect the presence of motion within their scotomatous fields without the ability to characterize the other attributes of the stimulus (Riddoch, 1917).

According to several authors (Covey & Stoerig, 1991; Morland et al., 2004; Stoerig & Covey, 1991), the blindsight phenomenon can be explained by at least three different hypotheses: (1) extrageniculate mediation through subcortical pathways, (2) geniculolateral mediation, and (3) partial sparing of visual cortex with sufficient preservation of cortical processing for stimuli to reach objective but not subjective thresholds. According to the first hypothesis, visual information transmitted through the retinotectal pathway or some other subcortical pathway (e.g. retinopulvinar) is projected to extrastriate visual cortex and is sufficient to drive visually guided behavior without awareness. According to the second proposition, direct projections from the lateral geniculate to extrastriate cortex may be sufficient for some visual discrimination and even for some "sensations" that patients do not experience as actually "seeing". Finally, based on the third hypothesis, "islands" of spared occipital cortex would explain implicit residual visual function such as blindsight. However, this last hypothesis has been challenged in studies showing complete defects on perimetric testing or complete visual defects in the contralateral visual field as demonstrated by neuroimaging techniques (see for discussion Ro and Rafal, 2006).

Despite the extensive use of eye movement direction and light detection training to rehabilitate visual field defects with moderate results, only a few studies have focused on the use of blindsight (or implicit vision) to restore conscious vision in the blind hemifield (Sahraie et al., 2006; Stoerig, 2006). Nevertheless, as Ro and Rafal (2006) pointed out, blindsight might provide a rational approach to rehabilitation. Zihl (2000) trained patients to localize unconsciously seen targets in their blind hemifield. They demonstrated that target localization improved with practice and that patients who improved felt more confident and less disabled, sug-

gesting that blindsight training may be of therapeutic value as well as rehabilitative. Unfortunately, it is difficult to ascertain whether the improvement was due to an objective visual field recovery (better conscious detection of visual targets) or due to an enlarged search field (better visual exploration). Using neuroimaging techniques (e.g., fMRI, ERP, ERMF) during visual detection and discrimination tasks, some recent studies pointed out how orienting attention in space may activate early visual cortex (Fu et al., 2005; Jack et al., 2006; Noesselt et al., 2002). Therefore, it is difficult to assess the role of attention on the improvement of visual capacities in the blind field. This point will be further addressed in the discussion section.

Ro and collaborators (Boyer et al., 2005; Ro et al., 2004; Ro & Rafal, 2006 for review), have used TMS to simulate blindsight in normal participants. According to these studies, spatial orientation and color processing might be spared even without primary visual cortex (inhibited by TMS) supporting the existence of a geniculolateral pathway that bypasses V1 and awareness (Stoerig & Covey, 1989; 1991). As proposed by Ro and Rafal (2006), since both orientation and color cannot be effectively processed by the superior colliculus the most plausible pathway supporting these visual discriminatory behaviors without V1 and awareness may be a direct geniculate pathway into area V4 of extrastriate cortex, which contains a high proportion of feature-selective and color-opponent cells (Zeki, 1980). This retino-tectal and/or geniculolateral pathway could be seen as the anatomical basis of direct visual processing without awareness (such as blindsight) and could be advantageously used in the restoration of visual function after primary visual cortex damage (Ro & Rafal, 2006). Most patients with visual cortex damage and resulting cortical blindness will have an intact superior colliculus making it possible to train or encourage patients to utilize their retino-tectal functions, and perhaps remnant extrastriate processes that may be intact, to enhance visual awareness (Ro & Rafal, 2006; Stoerig, 2006; Stoerig & Covey, 1989).

Consistent with this idea, Sahraie, Trevelyan, MacLeod et al. (2006) recently carried out a daily detection "training" task involving discrimination of simple grating visual stimuli over a 3-month period in a group of 12 cortically blind patients. Psychophysical measurements were carried out before and after the training, and included detection of a range of spatial frequencies (0.5–7 cycles per degree), contrast detection at 1 cycle per degree, clinical perimetry, and subjective estimates of visual field defect. The authors demonstrated that

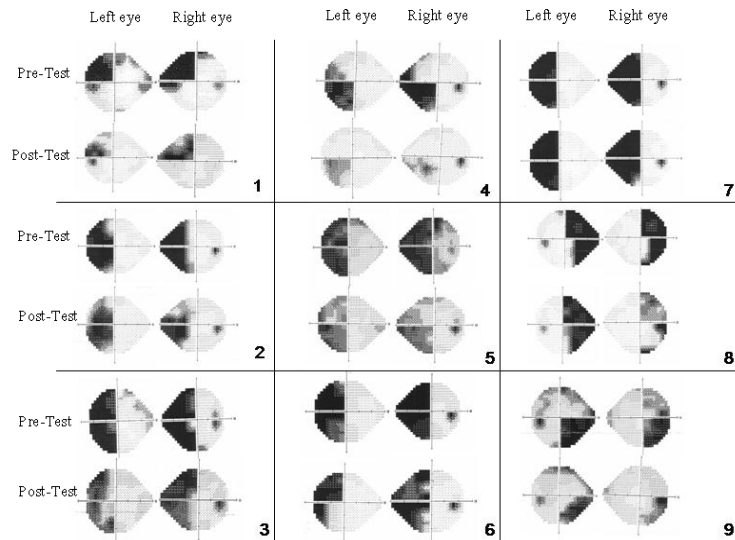


Fig. 1. For each patient, (a) Humphrey Automated Perimetry (24-2 Full Threshold program), from top to bottom: before training (VFT1), after training (VFT2) or (VFT3) for patients 2, 4, 5, 6, 8 and 9 who received an additional phase of training. (b) Lesion localization (CT-Scan and/or MRI).

repeated stimulation with appropriate visual stimuli in the blind visual field (and not only at the border zone as in VRT) can result in improvements in visual sensitivities in the very depths of the field defect thus confirming that visual performance in the blind visual field can be improved by training residual capacities even in the absence of patients' awareness.

Recently et al., (2007) used letters as stimuli presented to the blind field to train two hemianopic patients. Flicker stimuli were presented at 30° or with flickering letters at 10° eccentricity in the blind visual field twice a week for a year. Training continued with more peripheral stimuli thereafter. Flicker sensitivity and neuromagnetic responses were registered at 1–2-month intervals, and Goldman perimetries were recorded before, during and after training. Results showed that flicker sensitivity in the blind hemifield improved to the level of the intact hemifield within 30° eccentricity in one participant and 20° eccentricity in the other. In addition, flickering letters were recognized equally at 10° eccentricity in the blind and intact hemifields although no change was observed in the Goldman perimetry. Another study performed with the same team using the same experimental design (Hen-

riksson et al., 2007) demonstrated that this type of intensive training can reorganize visual cortices in such hemianopic patients. Indeed, magnetoencephalography documented changes in functioning during training, while cortical organization illustrated through fMRI demonstrated that following training visual information from both hemifields was processed mainly in the intact hemisphere. The fMRI mapping showed representations of both the blind and the normal hemifields in the same set of cortical areas within the intact hemisphere, specifically in the visual motion-sensitive area V5, in a region around the superior temporal sulcus and in retinotopic visual areas V1 (primary visual cortex), V2, V3 and V3a.

Within the same line of reasoning as Ro and Rafal (2006), Sahraie, Trevethan, MacLeod et al. (2006) and Stoerig (2006), the aim of the present study was to test if training visual capacities in the contralesional hemifield could induce an objective restoration of conscious vision in the blind field of hemianopic patients. Specifically, we examined the use of the blindsight phenomena in rehabilitating visual awareness in the blind hemifield. Instead of using simple visual detection and contrast discrimination in the blind visual field as Sahraie

Table 1
Demographic and clinical data

	Age	Sex ^a	Onset of illness (months)	Locus of ^b lesion	Etiology ^c	VFD ^d
P#1	59	M	64	O	Ischemic	LSQ
P#2	43	F	70	O	Hemorrhagic	LH
P#3	80	F	22	TO	Ischemic	LH
P#4	33	F	16	TO	CVT	LH
P#5	75	F	10	TPO	Ischemic	LH
P#6	24	F	14	TPO	TBI	LH
P#7	66	M	121	TPO	Meningioma	LH
P#8	54	M	12	TO	Ischemic	RH
P#9	67	M	26	PO junction	Hemorrhagic	RH

^a: M, Male; F, Female.
^b: F, Frontal ; T, Temporal ; P, Parietal ; O, Occipital.
^c: TBI, traumatic brain injury; CVT, cerebral venous thrombosis.
^d: VFD, Visual field defects; LH, left hemianopia; RH, right hemianopia; LSQ, left superior quadranopia.

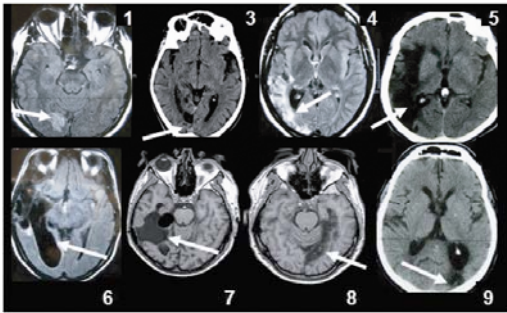


Fig. 2. Lesion localization (CT-Scan and/or MRI) as indicated by the white arrow for each patient (patient's number in the right corner).

et al. (2006) did, the current study aimed to submit hemianopic patients to more ecological tasks (i.e., localization and letter identification of static stimuli) and to measure the improvement with automated perimetry.

2. Materials and methods

2.1. Participants

Nine brain-damaged patients (4 men, 5 females; average age: 56; SD = 19.1) with a persistent homonymous visual field defect (VFD) were included in the study. Patients 1–7 had a left VFD, and Patients #8 and #9 presented a right VFD (Fig. 1). All patients were right-handed except Patient 2 who was left-handed. All patients had a documented, single unilateral hemispheric lesion, and no past history of previous stroke. None of the patients suffered from impaired vigilance,

confusion, general mental deterioration or psychiatric disorders. Visual acuity of all patients was corrected-to-normal. Time from onset of brain injury to the initial visit in our service (corresponding to the first visual field testing presented here) always exceeded six months (see Table 1) to ensure that possible recovery after training could not be attributed to spontaneous recovery. The location of brain lesion was determined based on brain MRI and/or CT scans¹ (see Fig. 2).

The type of visual field defects, etiology, the lesion location determined by neuroimaging and the onset of brain injury are detailed in Table 1. Patients carrying the diagnosis of neglect (tested with the BEN: Batterie d’Evaluation de la Négligence; Azouvi et al., 2002) were not included in the study.

¹Unfortunately, we did not obtain brain scans for patients #2 and #3.

2.2. General procedure

Visual field testing (VFT) was performed prior to the beginning of the rehabilitation program (VFT1) and again between 22 and 30 weeks after the first visual training session (VFT2) in order to assess the effects of rehabilitation. Six patients received an additional 10 weeks of training followed by a third visual field examination (VFT3).

In addition to the VFTs, all patients were assessed with behavioral visual tests (BVT). Four sets of BVTs were conducted: one prior to the initial training session (BVT1) as a pre-test measure and three following the first training session to measure the effects of the neurovisual training. Therefore, as post-test one BVT was conducted following the first training phase (BVT2), one following the second training phase (BVT3), and a final set one week after the end of the rehabilitation program (BVT4) (see Table 2 for design details).

2.2.1. Visual field testing

Visual field defects can be directly measured by perimetry techniques and are usually classified according to the quality of the deficit, the portion of the field affected, and the quantitative extent of the deficit (see Zihl, 2000 for review). The Humphrey Automated Standard 24-2 Full Threshold program (Haley, 1986) was used. With this program, 54 points, 6° apart of the visual field are tested at a distance of 24 degrees to measure the size of patients' visual fields and detect areas of non-seeing zones. Points in the visual field for each eye that were detected in less than 15 out of 30 stimulations were considered 'undetected points' (see Fig. 1). Perimetry testing in which loss of fixation occurred in more than 10% of the trials was discarded. Similarly, examinations where false positives or false negatives exceeded 5% were excluded.

VFTs were administered before and after the rehabilitation sessions (along with BVT1 and BVT3) and carried the same testing parameters at each session. As shown in Fig. 1a, patients with homonymous hemianopia (HH) or homonymous quadrantanopia (HQ) (except patient #3) did not present macular sparing at the initial stage.

2.2.2. Behavioral visual tests

Behavioral visual tests consisted of three computerized visual tasks (i.e., motor localization of targets, verbal localization of targets, and letter identification) performed using a PC-based system with a 17-inch, high-resolution monitor. Participants sat in a comfort-

able chair, directly in front of the middle of the computer touch screen and at a distance of 57 cm. Throughout the session, participants had to visually fixate on a dot at the center of the screen and were presented with three visual tasks in different, random order for each patient. The duration of each task was approximately seven minutes, with a three minute inter-task rest period. During this period, the monitor screen was gray and participants were free to close their eyes if they wished.

For the motor localization (ML) and verbal localization (VL) tasks patients had to localize the quadrant in which a visual target was presented. The target could appear at four different locations in each quadrant near (3°) or far (6°) from the fixation point (see Fig. 3) and each target was presented six times in each location (96 trials). The stimulus consisted of a black dot of 1.5° diameter presented alone on a white screen with a yellow central fixation dot of 0.8° diameter. Two response modes were tested: a verbal response (VL task), in which the patient had to report verbally where the stimulus appeared (upper left, upper right, lower left, or lower right), and a motor response (ML task) in which the patient had to point to the quadrant in which the stimulus appeared. Patients #1, #3, #5, #7, #9 began with the motor response condition and Patients #2, #4, #6, #8 began with the verbal response condition. Each display was flashed for 500 ms. When the participant responded, a 2000 ms inter-trial interval began. If the participant did not respond within the first 2000 ms, a 1000 ms delay was triggered.

For the letter identification (LI) task patients were presented three different letters (L, A or C) in a forced-choice recognition task. The letters were chosen with regard to their frequency and to their morphological properties (no physical or phonological similarities between them). The letter could appear either near the central fixation dot (3° in the left or right visual field) or at 6° from the central fixation in the left or right visual field (Fig. 3) and each target was presented six times in each location (96 trials). Each display was flashed for 500 ms. When the participant responded, a 2000 ms inter-trial interval began. If the participant did not respond within the first 2000ms, a 1000 ms delay was triggered. During the behavioral tasks, visual fixation was monitored by the experimenter and trials in which a saccadic movement occurred were discarded. In order to be able to perform the tasks while maintaining fixation, patients were trained several weeks before with a pure fixation task in which they had to fixate on a visual target centered to their eyes and their midsagittal body.

Table 2
Experimental design

Pre-test	20 training	Post-test	20 training	Post-test II	Post-test	Additional	Post-test
VFT1 +	sessions	I	sessions	BVT3	III	20 training	IV
BVT1	(10 weeks)	BVT2	(10 weeks)		VFT2 +	sessions	VFT3*
					BVT4	(10 weeks)*	

VFT: Visual field testing (Humphrey 24-2 Full-Threshold Automated Perimetry).
BVT: Behavioral visual tests.

*Additional training sessions and VF with six patients (# 2, 4, 5, 6, 8, 9).

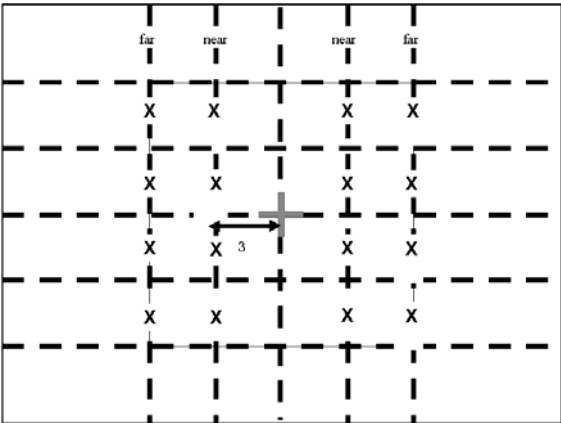


Fig. 3. Stimulus location in the localization and letter identification tasks.

2.2.3. Neurovisual training

Patients received 40 sessions of neurovisual training divided in two phases of 20 sessions each over a 22-week period. During the first 10 weeks, they performed 20 sessions of visual training followed by a two-week break. During weeks 12–22, a second set of 20 sessions were performed (see Table 2 for experimental design illustration). Each session comprised of four different tasks presented in a random order for each patient. The four computerized visual tasks were performed on a PC and consisted of (1) shape comparison, (2) detection, (3) judgment of orientation, and (4) letter identification. Participants sat in a comfortable chair, directly in front of and centered to the computer touch screen at a distance of 57 cm. During each task, participants had to visually fixate on a dot corresponding at the center of the screen.

The aim of *shape comparison task* was to train patients to perform forced-choice comparisons between two stimuli appearing in each hemifield (blind and healthy). Two different shapes were used, a rectangle (1° wide and 3° tall) and a triangle (base of 1°, 3°

tall). Sixteen different patterns of stimuli were presented eight times each (total 128 trials). The stimuli consisted of the two shapes, each appearing on each side of a white screen with a yellow central fixation dot of 6.5° diameter. In half of the trials ($n = 64$) patients were presented the same shape (2 rectangles or 2 triangles) in each hemifield, whereas in the remaining half, the two shapes were different. The shapes were always presented on the same horizontal meridian (top or bottom) but each shape appeared either near the fixation dot (3°) or far from it (6°). For the pre-test, two response modes were proposed. In the motor response condition, in the trials where identical shapes were presented in each hemifield, patients had to touch the screen, whereas no manual response was required if there were different shapes on each side. In the verbal response condition, patients were required to say 'same' in the cases where identical shapes were presented in each hemifield. Each display was flashed for 500 ms. When the participant responded, a 2000 ms inter-trial interval began. If the participant did not respond within the first 2000 ms, a 1000 ms delay was triggered.

Table 3
Visual Field Testing^a – Mean number of undetected targets (detected less than 15/30 stimulations)

Patient	VFT1 ^b		VFT2 ^c		VFT3 ^d	
	LE ^e	RE ^f	LE	RE	LE	RE
1	21	19	6	8	*	*
2	23	20	16	18	11	12
3	27	28	16	22	*	*
4	17	16	9	12	2	2
5	28	33	11	18	17	11
6	22	28	20	26	18	24
7	26	28	26	27	*	*
8	25	23	25	23	22	11
9	18	14	13	6	16	5
MEAN	23.11		16.78		12.58	
SD	5.14		7.12		7.19	

^a: Humphrey Automated Perimetry, 24-2 Full Threshold

^b: VFT1, Visual Field Testing-prior to any training

^c: VFT2, Visual Field Testing-22-30 weeks following first training phase

^d: VFT3, Visual Field Testing-following third training phase

^e: LE, Left Eye ^f: RE, Right Eye.

For the *detection task* patients had to detect the presence or absence of a stimulus and, in the case of detection, to localize the quadrant in which the visual target was presented. As in the localization task used in the BVTs, the target could appear at four different locations in each quadrant and each target was presented six times at each location. In 96 trials there was a stimulus presented at one of the possible locations whereas in 64 trials the screen was empty. Participants were informed about the presence of these catch trials. The stimulus type and experimental procedure is the same as for the localization task used for the BVTs (see above).

In the *judgment of orientation task* patients were presented black bars for 200 ms with three different orientations – vertical, 45° to the right, or 45° to the left – in a forced-choice recognition task. The stimulus could appear at nine different locations in each hemifield and was presented twice in each hemifield (108 trials). The patients were asked to mimic the orientation of the bar with their right hand.

Finally, in the *letter identification task* patients were presented three different letters (T, S or M) in a forced-choice recognition task (note that the letters used in pre and post-tests and in training sessions are different). One letter appeared either near the central fixation dot or further from it in the left or right visual field (see Fig. 3). Each letter was presented six times at each position resulting in 48 trials for each hemifield and 96 for the whole task. Each display was flashed for 500 ms. When the participant responded, a 2000 ms inter-trial interval began. If the participant did not respond, a 1000 ms delay ensued. As mentioned before,

visual fixation was monitored throughout the task by the experimenter and patients were trained several weeks before not to move their eyes during the task. During all the behavioral tasks (testing and training) feedback regarding the response accuracy was not provided to the patients.

3. Results

To ascertain the effect of the training tasks on visual function recovery, analyses were performed only on the VFT and BVT results, and not on the neurovisual training tasks. Left and right hemianopic patients were grouped together, thus the results refer to ipsi- and contralesional visual fields rather to left and right.

3.1. Visual field testing

A Wilcoxon paired samples non-parametric test was performed on the number of points detected at less than 15 out of 30 stimulations (considered as undetected points) on the VFTs of the nine patients to compare the size of the visual field at VFT1 and VFT2. Table 3 presents the mean number of undetected targets for each eye. Comparisons between VFT1 and VFT2 for both eyes show a significant decrease in the non-seeing/undetected zones of the visual field (Right Eye, RE: $T = 0$; $z = 2.52$; $p < 0.05$; Left Eye, LE: $T = 0$, $z = 2.37$; $p < 0.05$).

To investigate the effect of a third training phase, a Wilcoxon paired samples non-parametric test was performed on the VFT2 and VFT3 results of the six patients who received the additional training and visual field testing (see Table 3). A significant decrease in the non-seeing/undetected zones of the RE visual field was seen between VFT2 and VFT3 (RE: $T = 0$; $z = 2.2$; $p < 0.05$). There was no significant difference for LE ($T = 7.5$, $z = 0.63$; $p > 0.05$).

An Analysis of Variance (ANOVA) was performed the nine patients' VFT results with Eye (RE, LE) as the between subjects factor and Testing Time (VFT1, VFT2) as the within subjects factor. No effect of Eye was found. A main effect of Testing Time was seen with an overall decrease in the number of undetected points between VFT1 ($M = 23.11$, $SD = 5.14$) and VFT2 ($M = 16.78$, $SD = 7.13$), $F(1, 16) = 22.57$, $p < 0.001$.

Finally, an ANOVA was performed on the VFTs of the six patients who received the additional training, with Eye (RE, LE) as the between subjects factor, and

Table 4
Behavioral Visual Tests - Average performance in percent accuracy (and standard deviations) at each phase

Ipsilesional visual field	BVT1 ^a (pre-test)	BVT2 (10 weeks)	BVT3 (20 weeks)	BVT4 (22–30 weeks)	Means by task
Motor localization	95 (1.5)	97 (1.7)	98 (2.2)	99 (1.2)	97 (1.8)
Verbal localization	91 (3.1)	95 (1.7)	97 (2.1)	99 (1.1)	96 (2.9)
Letter identification	93 (2.9)	98 (1.9)	97 (2.1)	100 (0.6)	97 (2.6)
Means by testing time	93 (2.0)	96 (1.7)	97 (0.6)	99 (0.6)	97 (1.5)
Contralateral visual field	BVT1 (pre-test)	BVT2	BVT3	BVT4	Means by task
Motor localization	53 (6.4)	64 (6.3)	70 (5.2)	75 (6.1)	66 (6.2)
Verbal localization	42 (6.4)	55 (7.0)	64 (6.3)	70 (6.5)	58 (6.7)
Letter identification	44 (7.7)	55 (7.1)	62 (6.1)	72 (4.6)	59 (6.4)
Means by testing time	46.3 (5.9)	58 (5.2)	65 (3.5)	72 (2.52)	61 (4.8)

^a: BVT, Behavioral Visual Tests.

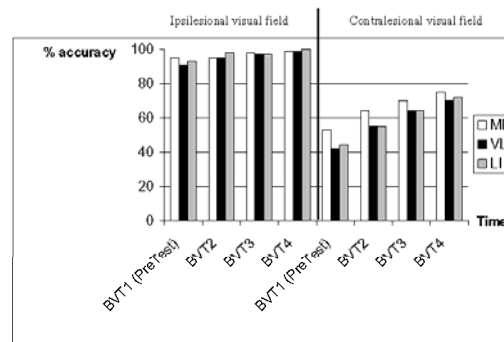


Fig. 4. Behavioral visual tests 1, 2 and 3 (BVT1, BVT2, BVT3): Pre- and post-test accuracy levels in the ipsi- and contralateral visual fields for motor localization (ML), verbal localization (VL) and letter identification (LI).

Testing Time (VFT1, VFT2 and VFT3) as the within subjects factor. Once again, there was no effect of Eye and a main effect of Testing Time was found, $F(2, 20) = 19.23$; $p < 0.000$. Planned comparisons with LSD post-hoc tests revealed fewer undetected targets during VFT2 ($M = 16.42$, $SD = 6.04$) ($p < 0.01$) compared to VFT1 ($M = 22.25$, $SD = 5.63$), and even fewer undetected targets during VFT3 ($M = 12.58$, $SD = 7.19$) ($p < 0.05$) compared to VFT2 and VFT1.

Figure 1 provides the VFT1, VFT2 or VFT3 (Humphrey Automated 24-2 Full Threshold perimetry) results for each patient, showing an objective increase of visual detection performance in all except one patient in the pathological (contralateral) visual field after 22 weeks of the rehabilitation program focused on blind-sight training. The only patient in which no objective amelioration was found was Patient #7. Interestingly, this patient is the only one who had suffered from a voluminous meningioma leading to surgery. As can be

observed in Patient #7's CT scan, the surgery led to the removal of a substantial part of the right temporo-parieto-occipital region. In addition, for this patient, there was a wider interval between the lesion and the rehabilitation program (121 months) as compared to the other patients.

3.2. Behavioral visual tests

As shown in Fig. 4, the pre- and post-BVT comparisons demonstrated a dramatic increase of performance in the contralateral visual field with neurovisual training for each of the visual tasks. The improvement was seen for the three tasks at BVT2, was increased at the BVT3, and maintained after the end of the rehabilitation program BVT4.

An ANOVA performed on the Time of Testing (BVT1, BVT2, BVT3, BVT4) x Visual Field (ipsilesional, contralateral) x Tasks (ML, VL, LI) revealed

a significant effect of the testing time on global performance, $F(3, 21) = 137.26$; $p < 0.000$), confirming the significant positive effect of training (Table 4).

As expected, the visual field stimulated had a significant effect on performance, $F(1, 7) = 120.56$; $p < 0.000$) with better performance in the ipsilesional ($M = 96.8$, $SD = 1.56$) than in the contralesional ($M = 61$, $SD = 7.81$) visual field. In addition, a significant effect of Task ($F(2, 14) = 10.61$, $p < 0.002$) was revealed, with better performance in the ML task ($M = 81.5$, $SD = 4.3$) than in the VL task ($M = 77$, $SD = 5.1$) and the LI task ($M = 78$, $SD = 5.2$) (see Fig. 4 and Table 4). In terms of interactions, a significant interaction between Testing Time and Task emerged ($F(6, 42) = 3.55$, $p < 0.005$) with greater improvement in the ipsilesional visual field for the ML task than for the other tasks (see Fig. 4 and Table 4). A significant interaction between the Visual Field of presentation and Task was also found, $F(2, 14) = 3.94$, $p < 0.005$. This interaction is due to the fact that, as expected, there was a greater improvement in the contralesional than in the ipsilesional visual field.

Figure 5 illustrates that improvement across time was present in all patients, even in Patient #7 who did not exhibit any objective improvement in the automated perimetry testing. However, our results confirm previous studies in showing that performance may vary across patients and across time. Interestingly, as several studies with neglect patients have described (Bartolomeo et al., 2001; Chokron et al., 2002) performance was much more variable in the contralesional than in the ipsilesional field even at BVT4 when some recovery had occurred (see Standard Deviations, Table 4).

Figure 6 illustrates the significant effect of stimulus location on performance during the ML and VL tasks, $F(1, 8) = 156.13$; $p < 0.000$, with better performance for stimuli presented near the fixation point than far from it at each testing time (i.e., BVT1, BVT2, BVT3, BVT4). In addition, we found a significant interaction between the visual field of presentation and the stimulus location ($F(3, 24) = 189.30$; $p < 0.001$) with a stronger effect of stimulus location in the contralesional versus ipsilesional visual field. Finally, as illustrated in Figure 6 performance improved for stimuli in the contralesional visual field presented both near the fixation point (BVT1, $M = 54.5$, $SD = 5.65$; BVT4, $M = 89.1$, $SD = 5.03$;) and far from fixation (BVT1, $M = 38.2$, $SD = 4.10$; BVT4, $M = 55.4$, $SD = 7.3$).

3.3. Functional vision recovery

In addition to the behavioral recovery, from a subjective point of view patients were aware of the im-

provement in daily life and observations of general visual and visual field improvement were noted by all of the patients (even for patient #7 who did not show any objective recovery during the perimetry testing). Indeed, patients reported to be more confident in their vision and more efficient when reading, walking or visually scanning. When performing the automated visual testing perimetry after the training sessions, they reported that they have 'seen' the stimuli for which they have answered. Several patients reported that after only a few rehabilitation sessions they became able to use their vision in their contralesional visual field at different occasions, especially in 'emergency' conditions. For example, Patient #7 was able to catch his razor in the blind hemifield while it was falling down. After ten weeks of rehabilitation (BVT2), when detecting letters and forms in their 'blind' hemifield patients were confident in their answer and reported that at this stage they were 'seeing' the stimulus they were answering. From a phenomenological point of view, at first, patients claimed that they did not see anything in their contralesional visual field and were 'guessing', then they reported that they 'felt' something in their blind field, they were then 'pretty sure' of their answer and finally they reported 'seeing' the stimulus in their ipsilesional visual field. Interestingly, this was also true for Patient #7 who experienced the same progression of 'subjective' improvement, despite the lack of improvement in the automated perimetry examination (see Fig. 1).

4. Discussion

The present study confirms that training implicit visual capacities can lead to an objective amelioration of conscious vision as demonstrated by the automated visual perimetry and behavioral visual task performance. Using forced-choice visual tasks known to elicit 'blindsight', we were able to rehabilitate conscious vision in the contralesional visual field in most patients (attested by the visual perimetry). Automatic perimetry is considered to be an objective way to measure the patients' visual recovery in the contralesional visual field (Sahraie, 2007). The only patient in whom no objective improvement at all was found using the perimetry examination was a patient who had undergone surgery of the right temporo-parieto-occipital region. Given the fact that these patients were 'chronic' patients (see Table 1) their recuperation cannot be seen as being the result of any spontaneous recovery. In addition, lack

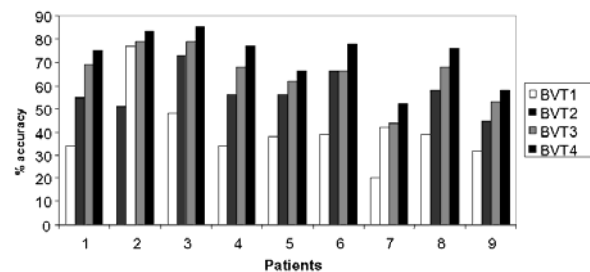


Fig. 5. Behavioral visual tests 1, 2 and 3 (BVT1, BVT2, BVT3) : Performance (accuracy level) across time in the contralesional visual field for each patient.

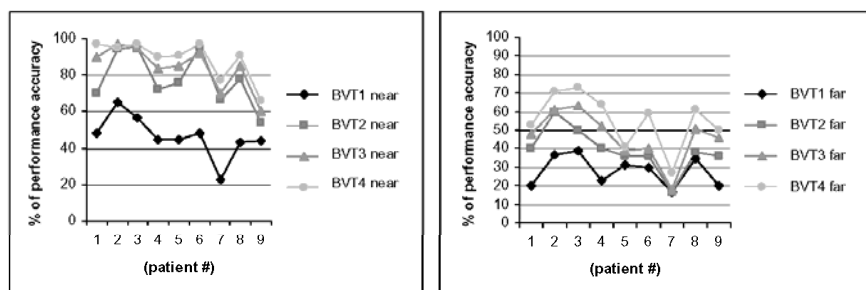


Fig. 6. Behavioral visual tests 1, 2 and 3 (BVT1, BVT2, BVT3): Pre- and post-test performance in the contralesional visual field for each patient near the fixation point (left) and far from the fixation point (right).

of a false positive tendency during the post-training VFTs rules out an artifactual result stemming from a tendency to over-respond (even when no stimulus is flashed in the blind hemifield). Finally, by using different tasks during the training and the testing phases, our results can be interpreted in terms of recovery rather than a learning effect biasing the performance during the post-tests.

In this way, the recovery we observed in the present hemianopic population might reflect a recuperation of 'explicit' vision in the contralesional visual field after training 'implicit' vision.

We will first discuss the objective improvement of visual detection as revealed by the automated perimetry and then the behavioral improvement measured by the ML and VL tasks as well as the LI task.

4.1. Visual field testing (automated perimetry)

To our knowledge only a few studies have demonstrated that training hemianopic patients may lead to

an improvement of visual detection as recorded by automated perimetry shown here (Kasten & Sabel, 1995; Kasten et al., 2006; Kasten et al., 2001; Kasten et al., 1999; Kasten et al., 1998; Kasten et al., 1998; Zihl, 2000). In the present study, there is a clear improvement for all patients except patient #7, as objectively measured with automated perimetry.

The fact that patient #7, who underwent surgery in the right temporo-parieto-occipital region, did not show any objective visual recovery confirms Zihl and von Cramon (1982; 1985) who hypothesized that visual field recovery can only be expected in cases with incomplete striate cortex injury. As in the present study, these authors were able to show that no recovery was observed in patients with complete destruction of the striate cortex on the affected side. However, it has to be noted that Patient #7 is the one with the most sizeable delay between lesion acquisition and rehabilitation procedure, which might be a worsening factor.

Careful inspection of Figure 3 reveals that the improvement always occurs for both eyes and is frequently

homonymous as is the deficit. This suggests a cortical plasticity within the visual areas with a preservation of retinotopic organization. This finding should be more thoroughly explored in future research in order to target cortical plasticity processes leading to visual field recovery. In addition, the present study (showing visual recovery in patients with a lesion in the left or right occipital lobe, including the primary visual cortex) contrasts with previous studies (Zihl & Von Cramon, 1985 and see also Zihl, 2000 for discussion), which suggest that improvement in visual fields following stroke is generally limited to cases in which the lesion is located outside the primary visual cortex (including association cortex, subcortical nuclei or deep white matter). Whether or not visual field defect improvement is associated with primary visual cortex damage or not is a controversial topic (Bosley et al., 1987). Furthermore, it is interesting to note that as reported in previous studies (see Zihl, 2000 for review), the extent of visual field recovery neither depended crucially on the age of the patient nor on the interval between the lesion acquisition and the start of the training program. For this reason, and as discussed by Zihl, a valid and reliable measure that indicates whether a patient has a good or poor prognosis for visual recovery is still lacking. However, the positive effects of our treatment underline the need to elaborate such a measure in order to decide which patient should be enrolled in such a program.

4.2. Behavioral visual tests and functional recovery

The first finding concerns the high performance of left and right hemianopic patients when localizing targets in the contralesional visual field even at the pre-test phase. This result confirms previous ones reported both in humans and monkeys (Covey & Stoerig, 1995; 1997; 2004). In addition, during all tests (pre and post) we observed a better performance in the ML than in the VL task, which confirm previous studies with blindsight patients (see Weiskrantz, 2004 for review). Furthermore, the results demonstrated greater improvement for the ML task than with the other tasks, suggesting that the more motor the task, the greater the improvement. This finding mirrors previous studies (i.e., Perenin & Jeannerod, 1975) in showing that motor tasks could involve more automatic responses than tasks requiring verbal responses. In addition, according to Schendel and Robertson (2004) detection can be increased in hemianopic patients by placing their arm near the visual stimuli, within the blind hemifield. This should be further investigated in order to design a more efficient training program for such patients.

4.3. Training implicit residual capacities

In the present study, we chose to train hemianopic patients with complex visual tasks (letter identification and judgment of orientation) rather than using simple visual detection tasks as in many previous studies (see Zihl, 2000 for review; Sahraie et al., 2006). This choice was motivated by several studies showing a preservation of activation in extrastriate visual cortex despite the presence of a lesion in the primary visual cortex area as well as an improvement of performance in the blind field with detection and identification training (Raninen et al., 2007). As discussed by Stoerig (2006), functional neuroimaging studies of human patients confirm that extrastriate visual cortex in the lesioned hemisphere continues to respond to stimulation of the blind hemifield. Blindsight also has been attributed to small islands of primary visual cortex that are supposed to survive the lesion. Although small islands of spared V1 tissue could be recruited to serve the implicit residual visual functions, the bulk of neuropsychological, anatomical, physiological, and neuroimaging data on both humans and monkeys indicate that blindsight is not just mediated subcortically, but that several extrastriate visual cortical areas retain or regain visual responsivity (Stoerig, 2006). In addition, the retino-recipient nuclei that have been physiologically investigated after striate cortical ablation showed responsivity to stimuli presented in the cortically blind field (Payne et al., 1996; Stoerig, 2006). Furthermore, all of these nuclei project directly (like the dLGN and the pulvinar) or indirectly (like the superior colliculus) to extrastriate visual cortical areas. The various extrastriate visual cortical areas differ in the extent to which they continue to respond to information from the blind hemifield. Dorsal stream areas appear to retain more responsivity (see Salin & Bullier, 1995 for review).

There is also evidence showing that area V5/MT displays the most robust responses after both cooling (Girard et al., 1992) and ablation of V1 (Rodman et al., 1989). Whereas neither V2 nor V4 retained more than a very small number of neurons responding to the contralateral hemifield when V1 was ablated or cooled (see Bullier et al., 1996 for review), visual responses were still evoked from neurons in the polymodal cortex of the superior temporal cortex (Bruce et al., 1986; see Stoerig, 2006 for discussion). The preserved activity in extravisual cortical areas (dorsal and ventral pathways) could account for the patients' ability to learn in a few weeks to detect, localize and identify stimuli in their blind hemifield. Recently, Trevethan, Sahraie and

Weiskrantz (2007) were able to show that D.B., the first extensively studied blindsight case, could successfully identify outlined low contrast images of objects, make successful 'same/different' discriminations for pairs of stimuli presented in his blind field and identify complex images (e.g., digital photographs) presented entirely within his cortically blind field. As we proposed here, Trevethan et al. (2007) underline the potential of using complex visual tasks for improvement in cases of blindsight.

Although the current study was able to demonstrate learning in hemianopic patients to localize and identify complex stimuli, it still remains difficult to understand how activating these extrastriate cortical areas can lead to a recovery of visual awareness in the blind hemifield as shown by the automated perimetry testing. Visual recovery in the blind field could result from a retroactivation from extrastriate cortical areas to spared islands of ipsilesional primary visual cortex, as suggested by recent studies (i.e., Silvanto et al., 2005), and/or could involve the participation of the intact hemisphere (Silvanto et al., 2007). We are currently running fMRI studies in the patients who recovered in their blind visual field to address this question more specifically. Another important issue raised by the present study is the contribution of attention to enhance visual recovery in the blind visual field.

4.4. Role of attention in visual recovery

As mentioned in the introduction, attention may play a crucial role in the recovery of the blind visual field by modulating the level of activation in striate, as well as extrastriate, cortex neurons (Bahrami et al., 2007; Fu et al., 2005; Jack et al., 2006; Noesselt et al., 2002) and may thus enhance visual detection and visual awareness in the contralesional visual field of hemianopic participants (Henriksson et al., 2007; Kentridge et al., 2004; Poppel et al., 2004; Sabel et al., 2004). Using complex visual tasks rather than simple visual detection to train hemianopic patients, as in the present study, may thus favor both the activity of extrastriate visual areas as well as the recruitment of exogenous and endogenous attention (Bartolomeo & Chokron, 2002). According to Ro and Rafal (2006), based on the strong relationship between attention and consciousness, it is conceivable that patients with visual field defects following primary visual cortex damage might be able to use reflexive attentional orienting mechanisms of the superior colliculus to eventually influence visual awareness. As we described here, although reports from patients suggest

that although there is no awareness of visual events, they sometimes have the sense or impression that something was presented, which may be a function of reflexive orienting and may influence their ability to localize and discriminate at above chance levels (i.e., show blindsight) (Mohler & Wurtz, 1977). Unfortunately, in the present study, we cannot disentangle the specific role of extrastriate area involvement and attentional processes in visual recovery.

Along the same lines, the present experiment revealed an effect of stimulus location on performance with better behavioral results for stimuli presented near rather than far from the fixation point regardless of testing time. This result could indicate that the observed improvement stems more from attentional rather than from a purely 'visual' process. However this result is challenged by the fact that during the post-test automated perimetry (VFT2 and VFT3), an improvement deeper in the ipsilesional visual field was observed in patients 1–5 and in patients 8 and 9 (up to 20°, see Fig. 1a). In this way, it is still difficult to assess if the observed recovery should be seen as the result of attentional process or is merely linked to a real plasticity of visual cortical areas. However, the recent study by Henriksson et al. (2007) suggests that some cortical plasticity, for example, ipsilesional visual cortex activation, could be at work in such a recovery process after training visual discrimination in the blind visual field. Further fMRI studies with recovered hemianopic patients should help confirm this hypothesis.

5. Conclusions

The present study clearly demonstrates that objective visual field recovery is possible in chronic hemianopic patients by training them to detect, identify, or localize stimuli within their blind visual field and not only in the border zone. Similar to Raninen et al. (2007), we showed that using complex stimuli in forced-choice tasks known to elicit blindsight may lead to an objective recovery of explicit, conscious vision as measured with automatic perimetry.

In the largest study of homonymous hemianopia (HH) with detailed follow-up evaluation, Zhang et al. (2006) clearly showed that the probability of spontaneous improvement of HH decreases with the time of the patient's first evaluation, suggesting that greatest HH recovery within the first weeks after cerebral injury. As we mentioned in the introduction, none of the cases with stable underlying brain disease and stable neuro-

logic status continued to spontaneously improve after 6 months. If blindsight can open a path toward visual field restitution, as suggested by Stoerig (2006), Sahraie et al. (2006), Raninen et al. (2007) and the present study, visual field rehabilitation strategies should be initiated early after injury. Furthermore, given that true spontaneous improvement after six months would be unusual in static neurologic diseases, documented improvement in the visual fields of these patients undergoing rehabilitative therapy would be considered a sign of therapeutic efficacy. In order to demonstrate how visual training based on training implicit visual capacities leads to conscious vision recovery in hemianopic patients, future research should include larger clinical trials and neuroimaging studies, as well as studies among patients with more peripheral deficits. We believe that there is an extraordinary clinical as well as theoretical benefit in the association between basic science, recovery, and rehabilitation studies in the field of vision, and hope that this area is likely to be one of active research in the future, as deficits in visual perception clearly lead to functional limitations and result in emotional distress.

Acknowledgements

This research was funded by the Edmond and Benjamin de Rothschild Foundations (New York and Geneva). We thank Seta Kazandjian for her invaluable help.

References

- This research was funded by the Edmond and Benjamin de Rothschild Foundations (New York and Geneva), (grant to the second author). We thank Seta Kazandjian for her invaluable help.
- Azouvi, P., Samuel, C., Dreyfus, L.A., Bemati, T., Bartolomeo, P., Beis, J.M., et al. (2002).
- Sensitivity of clinical and behavioral tests of spatial neglect after right hemisphere stroke. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 73, 160-6.
- Bahrami, B., Lavie, N., & Rees, G. (2007). Attentional load modulates responses of human primary visual cortex to invisible stimuli. *Current Biology*, 17, 509-513.
- Bartolomeo, P., & Chokron, S. (2002). Orienting of attention in left unilateral neglect. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26, 217-234.
- Bartolomeo, P., Sieroff, E., Chokron, S. & Decaix, C. (2001). Variability of response times as a marker of diverted attention. *Neuropsychologia*, 39, 358-363.
- Bosley, T. M., Dann, R., Silver, F.L., Alavi, A., Kushner, M., Chawluk, J.B., et al. (1987).

- Recovery of vision after ischemic lesions: Positron Emission Tomography. *Annals of Neurology*, 21, 444-50.
- Boyer, J.L., Harrison, S., & Ro, T. (2005). Unconscious processing of orientation and color without primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 16875-9.
- Bruce, C.J., Desimone, R., & Gross, C.G. (1986). Both striate cortex and superior colliculus contribute to visual properties of neurons in superior temporal polysensory area of macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 55, 1057-75.
- Bullier, J., Hupe, J.M., James, A., & Girard, P. (1996). Functional interactions between areas V1 and V2 in the monkey. *Journal of Physiology - Paris*, 90, 217-20.
- Chokron, S., Colliot, P., Bartolomeo, P., Rhein, F., Eusop, E., Vassel, P., et al. (2002). Visual, proprioceptive and tactile performance in left neglect patients. *Neuropsychologia*, 40, 1965-1976.
- Chokron, S., Dupierrix, E., Tabert, M. H., & Bartolomeo, P. (2007). Experimental remission of neglect. *Neuropsychologia*, 45, 3127-48.
- Cowey, A. (1967). Perimetric study of field defects in monkeys after cortical and retinal ablations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 19, 232-45.
- Cowey, A., & Stoerig, P. (1991). The neurobiology of blindsight. *Trends in Neuroscience*, 4, 140-5.
- Cowey, A., & Stoerig, P. (1995) Blindsight in monkeys. *Nature*, 373, 247-9.
- Cowey, A., & Stoerig, P. (1997). Visual detection in monkeys with blindsight. *Neuropsychologia*, 35, 929-39.
- Cowey, A., & Stoerig, P. (2004). Stimulus cueing in blindsight. *Progress in Brain Research*, 144, 261-77.
- Fu, S., Greenwood, P. M., & Parasuraman, R. (2005). Brain mechanisms of involuntary visuospatial attention: An event-related potential study. *Human Brain Mapping*, 25, 378-90.
- Girard, P., Salin, P. A., & Bullier, J. (1992). Response selectivity of neurons in area MT of the macaque monkey during reversible inactivation of area V1. *Journal of Neurophysiology*, 67, 1437-46.
- Goodall, R.J. (1957). Cerebral hemispherectomy: Present status and clinical indications. *Neurology*, 7, 151-162.
- Haley, M. J. (Ed.). (1986). *The Field Analyzer Primer* (2nd ed.). San Leandro, CA: Allergan Humphrey.
- Henriksson, L., Raninen, A., Näsinen, R., Hyvärinen, L., & Vanni, S. (2007). Training-induced cortical representation of a hemianopic hemifield. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 78, 74-81.
- Holmes, G. M. (1918). Disturbances of vision by cerebral lesions. *British Journal of Ophthalmology*, 2, 353-384.
- Huber, A. (1992). Homonymous hemianopia. *Neuro-ophthalmology*, 12, 351-366.
- Humphrey, N.K., & Weiskrantz, L. (1967). Vision in monkeys after removal of the striate cortex. *Nature*, 215, 595-597.
- Jack, A. I., Shulman, G. L., Snyder, A. Z., McAvoy, M., & Corbetta, M. (2006). Separate modulations of human V1 associated with spatial attention and task structure. *Neuron*, 51, 135-147.
- Kasten, E., & Sabel, B. A. (1995). Visual-field enlargement after computer-training in brain-damaged patients with homonymous deficits: An open pilot trial. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 8, 113-127.

- Kasten, E., Bunzenthall, U., & Sabel, B. A. (2006). Visual field recovery after vision restoration therapy (VRT) is independent of eye movements: An eye tracker study. *Behavioral Brain Research*, 175, 18-26.
- Kasten, E., Müller-Oehring, E., & Sabel, B. A. (2001). Stability of visual field enlargements following computer-based restitution training. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 23, 297-305.
- Kasten, E., Poggel, D. A., Müller-Oehring, E., Gothe, J., Schulte, T., & Sabel, B. A. (1999). Restoration of vision II: Residual functions and training-induced visual field enlargement in brain-damaged patients. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 15, 273-87.
- Kasten, E., Wüst, S., Behrens-Baumann, W., & Sabel, B. A. (1998). Computer-based training for the treatment of partial blindness. *Nature Medicine*, 4, 1083-7.
- Kasten, E., Wüst, S., & Sabel, B. A. (1998). Residual vision in transition zones in patients with cerebral blindness. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 20, 581-98.
- Kentridge, R. W., Heywood, C. A., & Weiskrantz, L. (2004). Spatial attention speeds discrimination without awareness in blindsight. *Neuropsychologia*, 42, 831-5.
- Kerkhoff, G., Münssinger, U., Haaf, E., Eberle-Strauss, G., & Stögerer, E. (1992). Rehabilitation of homonymous scotomas in patients with post-geniculate damage of the visual system: Saccadic compensation training. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 4, 245-54.
- Marshall, R. S., Ferrera, J. J., Barnes, A., Xian Zhang, O'Brien, K. A., Chmaysani, M., Hirsch, J., & Lazar, R. M., (2008). Brain activity associated with stimulation therapy of the visual borderzone in hemianopic stroke patients. *Neurorehabil Neural Repair*, 22, 136-44.
- Mohler, C. W., & Wurtz, R. H. (1977). Role of striate cortex and superior colliculus in visual guidance of saccadic eye movements in monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 40, 74-94.
- Morland, A. B., Le, S., Carroll, E., Hoffmann M. B., & Pambakian, A. (2004). The role of spared calcarine cortex and lateral occipital cortex in the responses of human hemianopes to visual motion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 204-218.
- Mueller, I., Mast, H. & Sabel, B. A., (2007). Recovery of visual field defects: A large clinical observational study using vision restoration therapy. *Restor Neurol Neurosci*, 25(5-6), 563-72.
- Noesselt, T., Hillyard, S. A., Woldorff, M. G., Schoenfeld, A., Hagner, T., Jancke, L., et al. (2002). Delayed striate cortical activation during spatial attention. *Neuron*, 35, 575-87.
- Pambakian, A. L., Currie, J., & Kennard, C. (2005). Rehabilitation strategies for patients with homonymous visual field defects. *Journal of Neuro-Ophthalmology*, 25, 136-142.
- Pambakian, A. L., & Kennard, C. (1997). Can visual function be restored in patients with homonymous hemianopia? *British Journal of Ophthalmology*, 81, 324-8.
- Payne, B. R., Lomber, S. G., Macneil, M. A., & Cornwell, P. (1996). Evidence for greater sight in blindsight following damage of primary visual cortex early in life. *Neuropsychologia*, 34, 741-74.
- Perenin, M. T., & Jeannerod, M. (1975). Residual vision in cortically blind hemifields. *Neuropsychologia*, 13, 1-7.
- Poggel, D. A., Kasten, E., & Sabel, B. A. (2004). Attentional cueing improves vision restoration therapy in patients with visual field loss. *Neurology*, 63, 2069-2076.
- Raninen, A., Vanni, S., Hyvärinen, L., & Näsinen, R. (2007). Temporal sensitivity in a hemianopic visual field can be improved by long-term training user flicker stimulation. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 78, 66-73.
- Ro, T., Shelton, D., Lee, O. L., & Chang, E. (2004). Extrageniculate mediation of unconscious vision in transcranial magnetic stimulation-induced blindsight. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 9933-9935.
- Ro, T., & Rafal, R. (2006). Visual restoration in cortical blindness: Insights from natural and TMS-induced blindsight. *Neuropsychological Rehabilitation*, 16, 377-96.
- Riddoch, G. (1917). Dissociation of visual perceptions due to occipital injuries with special reference to appreciation of movement. *Brain*, 40, 15-57.
- Rodman, H. R., Gross, C. G., & Albright, T. D. (1989). Afferent basis of visual response properties in area MT of the macaque. I. Effects of striate cortex removal. *Journal of Neuroscience*, 9, 2033-50.
- Sabel, B. A., & Kasten, E. (2000). Restoration of vision by training of residual functions. *Current Opinion in Ophthalmology*, 11, 430-6.
- Sabel, B. A., Kenkel, S., & Kasten, E. (2005). Vision restoration therapy. *British Journal of Ophthalmology*, 89, 522-4.
- Sabel, B. A., Kenkel, S., & Kasten, E. (2004). Vision restoration therapy (VRT) efficacy as assessed by comparative perimetric analysis and subjective questionnaires. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 22, 399-420.
- Sahraie, A. (2007). Induced visual sensitivity changes in chronic hemianopia. *Current Opinion in Neurology*, 6, 661-66.
- Sahraie, A., Trevelyan, C. T., MacLeod, M. J., Murray, A. D., Olson, J. A., & Weiskrantz, L. (2006). Increased sensitivity after repeated stimulation of residual spatial channels in blindsight. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 14971-6.
- Salin, P. A., & Bullier, J. (1995). Corticocortical connections in the visual system: structure and function. *Physiological Reviews*, 75, 107-54.
- Schendel, K., & Robertson, L. C. (2004). Reaching out to see: Arm position can attenuate human visual loss. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 935-43.
- Silvanto, J., Lavie, N., & Walsh, V. (2005). Double dissociation of V1 and V5/MT activity in visual awareness. *Cerebral Cortex*, 15, 1736-1741.
- Silvanto, J., Cowey, A., Lavie, N., & Walsh, V. (2007). Making the blindsighted see. *Neuropsychologia*, 45, 3346-3350.
- Stoerig, P. (2006). Blindsight, conscious vision and the role of primary visual cortex. *Progress in Brain Research*, 155, 217-34.
- Stoerig, P., & Cowey, A. (1989). Wavelength sensitivity in blindsight. *Nature*, 342, 916-918.
- Stoerig, P., & Cowey, A. (1991). Increment-threshold spectral sensitivity in blindsight: Evidence for colour opponency. *Brain*, 114, 1487-1512.

- Stoerig, P., & Cowey, A. (1997). Blindsight in man and monkey. *Brain*, 120, 535-59.
- Trevelan, C. T., Sahaie, A., & Weiskrantz, L. (2007). Form discrimination in a case of blindsight. *Neuropsychologia*, 45, 2092-103.
- Ukei, K. (1966). Hemispherectomy in the human with special reference to the preservation of function. *Progress in Brain Research*, 21, 285-338.
- Van der Wildt, G. J., & Bergsma, D. P. (1997). Visual field enlargement by neuropsychological training of a hemianopsia patient. *Documenta Ophthalmologica*, 93, 277-92.
- Weiskrantz, L., Warrington, E. K., Sanders, M. D., Marshall, J. (1974). Visual capacity in the hemianopic field following a restricted occipital ablation. *Brain*, 97, 709-28.
- Weiskrantz, L. (1986). *Blindsight: A case study and implications*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Weiskrantz, L. (1996). Blindsight revisited. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 215-20.
- Weiskrantz, L. (2004). Roots of blindsight. *Progress in Brain Research*, 144, 229-41.
- Zeki, S. (1980). The representation of colours in the cerebral cortex. *Nature*, 284, 412-8.
- Zhang, X., Kedar, S., Lynn, M. J., Newman, N. J., & Biouesse, V. (2006). Natural history of homonymous hemianopia. *Neurology*, 66, 901-5.
- Zihl J. (1981). Recovery of visual functions in patients with cerebral blindness. Effect of specific practice with saccadic localization. *Experimental Brain Research*, 44, 159-69.
- Zihl, J. (1995). Visual scanning behaviour in patients with homonymous hemianopia. *Neuropsychologia*, 33, 287-303.
- Zihl, J. (2000). *Rehabilitation of visual disorders after brain injury*. Hove, UK: Psychology Press.
- Zihl, J., & von Cramon, D. (1979). Restitution of visual function in patients with cerebral blindness. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 42, 312-22.
- Zihl, J., & von Cramon, D. (1982). Restitution of visual field in patients with damage to the geniculostriate visual pathway. *Human Neurobiology*, 1, 5-8.
- Zihl, J., & von Cramon, D. (1985). Visual field recovery in patients with postgeniculate damage: A review of 55 cases. *Brain*, 108, 335-65.

5. Discussion et Conclusion

Les résultats de cette étude confirment que l'entraînement des capacités visuelles implicites peut engendrer une amélioration objective de la vision consciente, ceci est démontré par les performances obtenues à l'examen du champ visuel automatisé et par les performances obtenues aux tâches comportementales proposées.

En utilisant une tâche visuelle en choix forcé (connue pour solliciter les capacités de *blindsight*, Cf. PARTIE 1 Chapitre 3 sur le *blindsight*) nous avons réussi à rééduquer et à améliorer la perception consciente dans le champ visuel controlésionnel (c'est à dire le champ hémianopsique) chez la plupart des patients ayant participé à notre étude. Nous pouvons mesurer cette amélioration au niveau du champ visuel, de manière objective à l'aide d'une périmétrie automatisée de type Humphrey (Sahraie, 2007). Le seul patient de notre étude, ne présentant pas d'amélioration au niveau du champ visuel de manière objective, présente une lésion pariéto-occipito-temporale à la suite d'une résection tumorale (ablation de la tumeur). Cette amélioration au niveau du champ visuel ne semble pas être biaisée par une récupération spontanée, qui prend forme en général durant la phase-aigüe estimée à 6 mois après la lésion, puisque les patients sont tous en phase « chronique » (Cf. table 1 dans l'article précédent, présentant les données cliniques de chaque patient). De plus, l'utilisation d'une mesure objective telle que les champs visuels automatisés Humphreys, à la suite de l'entraînement, permet de vérifier les stratégies de réponse adoptées par les patients. Ceux-ci ne mettent pas en évidence de faux positifs au niveau des réponses données, ce qui souligne la fiabilité des résultats. En effet à la suite de la phase d'entraînement les patients pourraient avoir tendance à « trop » répondre, même lorsqu'il n'y a pas de stimulus présenté dans le champ aveugle, et par conséquent obtenir un seuil de bonnes réponses important du fait qu'ils aient toujours répondu même en l'absence de cible. Enfin, en utilisant deux tâches différentes durant la phase d'entraînement et la phase test, l'amélioration des performances observée chez les patients peut être alors interprétée comme une réelle récupération et non comme un effet d'apprentissage venant biaiser les performances en post-test dû au test-retest.

Par conséquent, l'amélioration observée chez les patients hémianopsiques reflète une récupération de la vision « explicite » au niveau du champ visuel controlésionnel à la suite d'un entraînement de la vision « implicite » (vision aveugle).

A notre connaissance, il n'y a que très peu d'études qui mettent en évidence une amélioration du champ visuel à la suite d'un apprentissage dans le champ (Kasten et Sabel, 1995 ; Kasten, Bunzenthal et Sabel, 2006 ; Kasten, Müller-Oehring et Sabel, 2001 ; Kasten, Poggel, Müller-Oehring, Gothe, et *al.*, 1999 ; Kasten, Poggel, Sabel, 2000 ; Raninen et *al.*, 2007 ; Zihl, 2000; Bergsma et *al.*, 2012). Dans cette étude, les résultats mettent en évidence de manière claire l'amélioration des champs visuels des patients par une périmétrie automatisée. Un seul patient ne présente pas la même amélioration (le patient #7) l'étiologie de sa lésion n'est pas la même que celle des autres, il a en effet subi une chirurgie au niveau de la région occipito-temporo-pariétale. Ce résultat va dans le sens des travaux de Wessinger, Fendrich, Gazzaniga (1999) selon lesquels les capacités de *blindsight* ou la récupération du champ visuel (Zihl et Von Cramon, 1982) peuvent s'observer seulement dans les cas où la lésion du cortex strié est incomplète, c'est-à-dire dans le cas où il existe des îlots corticaux préservés au niveau occipital. On peut supposer alors que lors d'une étiologie vasculaire il reste probablement des zones corticales épargnées, contrairement à une chirurgie avec exérèse de matière.

De plus, les résultats observés (mettant en évidence une récupération du champ visuel chez les patients souffrant d'une lésion occipitale gauche ou droite, comprenant le cortex visuel primaire) ne vont pas dans le même sens que ceux décrits par des études antérieures (Zihl et Von Cramon, 1985), selon lesquelles l'amélioration du champ visuel à la suite d'un AVC (accident vasculaire cérébral) est restreinte lorsque la lésion atteint le cortex visuel primaire, elle l'est moins lorsque la lésion touche les régions autour de V1. Il est également important de noter que selon certaines études (voir Zihl, 2000 pour revue), l'étendu du champ récupéré ne dépend ni de l'âge du patient ni de l'intervalle entre la lésion et le début de la rééducation. C'est aussi pour cette raison, comme cela a été déjà discuté par Zihl, qu'il n'est pas possible de donner au patient un pronostic de récupération. Il est par conséquent important de continuer cette étude sur une cohorte de patients de tout âge et souffrant de lésion cérébrales de différentes étiologies, afin de pouvoir essayer d'élaborer une méthode de mesure afin d'estimer au préalable l'effet de la rééducation.

5.1. Modification comportementale

Le premier résultat intéressant concerne les bonnes performances obtenues par les patients HLHd et HLHg pour localiser les cibles dans le champ visuel aveugle controlésionnel, ceci

même à l'étape de pré-test. Ceci va dans le sens de résultats rapportés à la fois par des études chez l'homme et chez le singe (Cowey et Stoerig, 2004). De plus, nous observons que les performances qui s'améliorent le plus sont celles obtenues par les patients pour la tâche de pointage, impliquant une réponse motrice, ce qui avait été également observé par d'autres études (Perenin et Jeannerod, 1975 ; Rossetti et Pisella, 2002 ; Danckert et *al.*, 2003). Comme évoqué lors de la partie sur « l'action blindsight » (PARTIE 1, chapitre 3 sur le *blindsight*), le geste de la main orienté vers la cible présentée dans le champ visuel aveugle, non perçue consciemment, permet d'obtenir de meilleures performances par rapport aux tâches verbales. Ceci est à étudier de manière plus approfondie, afin de mettre en place un programme de rééducation adaptée pour les patients HLH.

5.2. Entraînement des capacités visuelles implicites

Dans cette étude nous avons décidé d'entraîner les patients hémianopsiques à l'aide de tâches visuelles complexes telles que l'identification de lettres ou le jugement d'orientation de lignes, plutôt que d'utiliser des tâches visuelles de plus bas niveau comme décrit dans de nombreuses études antérieures (Zihl, 2000 ; Sahraie, Treveltham, MacLeod et *al.*, 2006). Cette décision a été prise en fonction de résultats mis en évidence par plusieurs études qui ont pu observer un lien entre l'amélioration des performances sur le plan comportemental à l'aide de tâches de détection ou d'identification dans le champ visuel aveugle, et l'activation corticale au niveau des régions extra-striées malgré la lésion de V1 (cortex visuel primaire strié) (Raninen, Vanni, Hyvärinen et Näsänen, 2007). Le cortex visuel extra-strié au niveau de l'hémisphère lésé, continuerait à répondre aux stimuli présentés dans le champ visuel aveugle (Stoerig, 2006).

Les patients parviennent à apprendre en quelques semaines à détecter, à localiser, et à identifier des stimuli dans le champ visuel aveugle, ce résultat va dans le sens de l'hypothèse selon laquelle les aires visuelles associatives (extra-striées) préservent leur fonctionnement. Treveltham, Sahraie et Weiskrantz (2007) ont montré que la patiente hémianopsique D.B. parvient à identifier les images présentées en faibles contrastes, à discriminer des paires d'images et à identifier des images complexes présentées dans son visuel aveugle.

Ces résultats combinés aux nôtres, soulignent l'intérêt d'utiliser des tâches visuelles complexes pour stimuler le champ visuel aveugle des patients hémianopsiques présentant des capacités de *blindsight*.

Cependant, il est toujours difficile d'expliquer comment les aires visuelles extra-striées activées lors des tâches visuelles peuvent être responsables de la récupération de la vision consciente au niveau du champ visuel aveugle, comme le montre les champs visuels automatisés dans notre étude. La récupération au niveau du champ visuel aveugle pourrait s'expliquer, comme cela a été suggéré par des études récentes, par la présence d'une boucle retro-active venant des aires corticales extra-striées et allant vers les îlots corticaux épargnés au niveau du cortex visuel primaire lésé (Silvanto, Lavie et Walsh, 2005), et/ou cela pourrait s'expliquer par la sollicitation des aires visuelles au niveau de l'hémisphère sain (Silvanto, Cowey, Lavie et Walsh, 2007, Bridge et *al.*, 2008). Un autre point important à discuter par rapport aux résultats observés, est celui du rôle de l'attention dans l'amélioration du champ visuel aveugle.

5.3. Rôle de l'attention dans l'amélioration du champ visuel

L'attention joue un rôle crucial dans la récupération de la vision au niveau du champ aveugle, en modulant l'activation au niveau des régions striées et extra-striées (Bahrami, Lavie et Rees, 2007 ; Fu, Greenwood et Parasuraman, 2005) elle peut ainsi améliorer la détection et la conscience visuelle au niveau du champ controlésionnel (aveugle) des patients hémianopsiques (Henriksson, Raninen, Näsänen, Hyvärinen et Vanni, 2007). On peut supposer que l'utilisation d'une tâche visuelle complexe, de haut niveau cognitif, pour entraîner les patients, permettrait d'activer les aires visuelles extra-striées. Malheureusement dans cette étude il est impossible de pouvoir faire la part des choses entre l'implication et la réorganisation des aires extra-striées et les processus attentionnels dans la récupération visuelle. Mais, certaines études ont pu mettre en évidence à l'aide de l'IRMf une réorganisation corticale (Henriksson, Raninen, Näsänen, Hyvärinen et Vanni ; 2007 ; Nelles et *al.*, 2002, 2007 ; Goebel et *al.*, 2001) par exemple une activation du cortex visuel au niveau de l'hémisphère lésé, qui pourrait sous-tendre ce genre de récupération à la suite de la stimulation du champ visuel aveugle.

Il serait intéressant par la suite d'étudier à l'aide de l'IRMf les activations cérébrales chez les patients HLH ayant récupéré du champ visuel.

5.4. Conclusion

Cette recherche montre de manière objective que la récupération du champ visuel est possible chez les patients hémianopsiques, et ce en phase « chronique », en les entraînant à détecter, identifier et localiser des stimuli présentés dans le champ visuel aveugle, et pas seulement au niveau de la zone frontière entre le CV voyant et le CV aveugle. Tout comme Raninen, Vanni, Hyvärinen et Näsänen (2007), nous avons montré que le fait d'utiliser des stimuli complexes lors d'une tâche en choix forcé permet aux patients d'utiliser ces capacités de *blindsight* et ensuite de récupérer de manière objective une vision explicite, consciente comme le montre l'évaluation du champ visuel à l'aide d'une périmétrie automatisée.

Résumé

Neuf patients souffrant d'une lésion occipitale unilatérale, ont participé au programme de rééducation durant 22 semaines. Celle-ci comprend des tâches visuelles en choix forcé (connues pour solliciter les capacités de *blindsight*) telles que : détection de cibles, localisation, traitement de l'orientation spatiale, reconnaissance de lettres. Pour chaque tâche, les stimuli sont présentés dans le champ visuel aveugle et dans le champ voyant et le patient doit donner une réponse sur la présence, la localisation ou la nature du stimulus dans chaque hémichamp même en l'absence de perception consciente du stimulus. Une évaluation est proposée aux patients avant et après la rééducation. Les résultats mettent en évidence une amélioration significative au niveau des performances obtenues aux épreuves comportementales et une récupération de plusieurs degrés dans le champ visuel contralésionnel objectivable à la périmétrie automatisée (Humphreys).

Dans cette étude les patients hémianopsiques sont poussés à détecter, localiser et reconnaître des stimuli dans leur champ aveugle même en l'absence de détection consciente. Les résultats montrent qu'un entraînement de la vision implicite, non consciente peut conduire à une récupération objective de la perception visuelle consciente dans le champ aveugle. Néanmoins, l'absence de récupération objective chez le patient ayant subi une exérèse pariéto-occipitale droite laisse penser qu'il est nécessaire pour objectiver une restauration du champ visuel que la zone péri-lésionnelle soit intègre en particulier au niveau des fibres d'association.

Cette recherche montre que la restauration du champ visuel est possible chez les patients hémianopsiques, et cela même en phase « chronique », en les entraînant à détecter identifier et localiser des stimuli présentés dans le champ visuel aveugle. Les amputations du champ visuel d'origine centrale ne devraient plus être considérées comme irréversibles et résistantes à toute prise en charge.

Discussion Générale

Les objectifs de cette thèse sont tout d'abord d'évaluer l'effet de la consigne sur le traitement d'une même tâche visuelle chez les participants sains, en tenant compte du rôle de la spécialisation hémisphérique selon les stimuli utilisés, puis d'observer les répercussions d'une lésion occipitale selon la tâche demandée, dans le champ visuel central et les champs latéralisés. Les objectifs de cette thèse sont ensuite d'observer à l'aide de l'IRMf, les substrats neuronaux impliqués selon la tâche réalisée, chez les participants sains et chez les patients hémianopsiques afin d'évaluer les conséquences d'une lésion occipitale selon sa latéralisation. Le dernier point de ce travail, est de proposer une méthode de restauration du champ visuel, en s'appuyant sur les capacités de perception implicite au sein du champ aveugle.

Pour cela, nous avons proposé au cours de ce travail, des tâches de traitement de scènes naturelles en champ central et en champs latéralisés à des participants sains et des patients porteurs d'une lésion occipitale unilatérale. Nous avons mesuré leurs performances comportementales (temps de réaction et précision des réponses obtenues), mais également les patterns d'activation cérébrale associés aux processus de détection et de catégorisation visuelle grâce à l'IRMf. Nous avons d'une part utilisé des scènes naturelles dans le souci d'adopter une approche la plus écologique possible, et nous avons d'autre part filtré nos stimuli en différentes fréquences spatiales.

Nos résultats mettent en exergue chez les participants sains un effet de la consigne sur la réalisation d'une tâche visuelle. C'est-à-dire que selon la demande cognitive, les performances sont différentes, pourtant la même tâche est utilisée, seule la consigne diffère.

Ceci confirme que l'introduction d'une consigne plus complexe pour la catégorisation s'accompagne de la mise en œuvre d'un traitement de plus haut niveau comparativement à la détection (Schyns et Oliva, 1994). D'une manière plus générale, ces données sont cohérentes avec certaines études en imagerie qui suggèrent qu'un changement de consigne, est à même de modifier (parfois grandement) le traitement cérébral (et donc le réseau cérébral) sous-jacent (Fink et *al.*, 2002).

L'hémianopsie consécutive à une lésion rétro-chiasmatique est associée d'une part à une altération des capacités de détection ou de catégorisation visuelle de scènes naturelles et

d'autre part à un remaniement des patterns d'activations cérébrales dépendants de la latéralisation de la lésion.

Nous allons discuter les résultats obtenus chez les participants sains dans un premier temps et chez les patients hémianopsiques dans un second temps, lors d'une tâche de détection et de catégorisation de scènes naturelles, filtrées en HFS, BFS et non filtrées, présentées en champ visuel central et en champ latéralisés. Nous discuterons séparément les résultats obtenus dans le champ sain, le champ central et dans le champ aveugle. Ceci nous amènera à soulever la question du *blindsight*. Nous présenterons la discussion des résultats obtenus en IRMf, mettant en évidence un pattern d'activation différent selon la latéralisation de la lésion. Nous aborderons enfin les résultats obtenus à la suite d'une rééducation intensive, permettant une amélioration du champ visuel.

1. Chez les participants sains

1.1. Spécialisation hémisphérique

Chez les participants sains (hommes jeunes, femmes jeunes et hommes âgés) les résultats lors de la consigne de détection et de catégorisation montrent que le traitement est plus lent pour les scènes en hautes fréquences par rapport à celles en basses fréquences et non filtrées. Ce résultat va dans le sens de certains travaux suggérant que les informations BFS précèdent les informations HFS au niveau des aires visuelles primaires (Marendaz et *al.*, 2003). Ces données indiquent l'existence d'un traitement *coarse-to-fine*, selon lequel l'information grossière issue des basses fréquences est disponible avant l'information plus fine, véhiculée par les hautes fréquences spatiales. Les basses fréquences véhiculées par la voie magnocellulaire sont plus rapidement traitées que les hautes fréquences transmises par la voie parvocellulaire (Van Essen et DeYoe, 1995 ; Bullier et *al.*, 1998).

Durant la tâche avec la consigne de détection nous observons, chez les participants sains, de meilleures performances aussi bien en terme de précision que de vitesse de traitement lorsque les scènes sont présentées dans le champ visuel gauche que dans le champ visuel droit. Ceci pourrait s'expliquer par une préférence visuo-attentionnelle gauche chez ces sujets droitiers, s'accordant avec les observations de Heilman et *al.* (1993). Selon ces auteurs, l'hémisphère droit gère, au niveau attentionnel, les deux champs visuels tandis que

l'hémisphère gauche gère uniquement le champ visuel droit, créant ainsi une « pseudo-négligence » droite chez les sujets sains, expliquant ainsi cette préférence visuo-attentionnelle gauche.

Il a été maintes fois démontré que l'hémisphère droit est plus spécialisé que le gauche dans le traitement de l'espace. Par conséquent, une lésion de l'hémisphère droit aura d'autant plus d'impact que la tâche est visuo-spatiale.

On remarque que les hommes âgés sont aussi rapides que les jeunes pour détecter les scènes en basses fréquences, ce qui va dans le sens des résultats observés par Roux et Ceccaldi (2001) selon lesquels les processus de traitement global ne sont pas affectés par l'âge.

Enfin, en catégorisation, avec les scènes non filtrées, il n'existe pas d'effet du champ visuel de présentation. Nos résultats vont dans le sens du modèle de Goldberg selon lequel les scènes naturelles sont traitées de manière équivalente par les deux hémisphères. Il n'y aurait donc pas de spécialisation hémisphérique pour traiter les scènes non-filtrées (voir Peyrin et *al.*, 2003).

1.2. Effet de la consigne

Chez les contrôles, la tâche réalisée avec la consigne de détection et de catégorisation sollicite le lobe occipital, le gyrus fusiforme gauche (AB 37), le lobe pariétal supérieur (AB 7) de manière bilatérale, la région frontale gauche (aire motrice primaire AB 4/6, aire prémotrice AB 6, et AB 9), et le cervelet droit. De plus, on peut observer une activation du lobe occipital droit (AB 6) pour la détection alors que pour la catégorisation on observe une activation plus marquée au niveau du gyrus frontal droit inférieur (AB 9). Ces dernières sont généralement plus impliquées dans la planification et l'exécution de mouvement de la main ou des yeux, que pour le traitement visuo-spatial (e.g., Fink et *al.*, 2002).

Au niveau du cortex occipital, la détection induit une activation au niveau du gyrus occipital inférieur (AB 18) de manière bilatérale. Alors que pour la catégorisation on observe une activation uniquement au niveau du gyrus occipital moyen et inférieur gauche

(AB 18, AB 19). Ces résultats vont dans le même sens que ceux rapportés par Fink et *al.* (2002) selon lesquels seul le changement de consigne, en gardant la même procédure expérimentale et les mêmes stimuli, est à l'origine d'une activation différente au niveau des aires visuelles. De plus, les deux consignes génèrent une activation asymétrique différente au niveau des aires occipitales (mis à part l'activation commune entre les deux au niveau du gyrus occipital inférieur gauche). En effet, la détection active le gyrus occipital inférieur droit alors que la catégorisation sollicite le gyrus occipital moyen gauche. Cette asymétrie occipitale corrobore de précédentes données obtenues en imagerie chez les participants sains (Han et *al.*, 2002). Leurs travaux indiquent en effet que lorsque les stimuli visuels sont présentés en champ central et que le sujet est amené à porter son attention à un niveau global, l'hémisphère droit est préférentiellement sollicité, comme c'est le cas dans notre tâche réalisée avec la consigne de détection. Dans ce type d'épreuve, l'information globale (extraite de la scène) suffit à détecter la présence d'une image. À l'inverse, l'hémisphère gauche est préférentiellement sollicité lorsque l'attention est orientée au niveau local de la cible à traiter, comme c'est le cas lors de la catégorisation durant laquelle les détails de la scène doivent être traités afin de pouvoir distinguer les scènes selon leur catégorie comme précédemment décrit avec d'autres protocoles (Chokron et *al.*, 2000).

L'existence d'un circuit neuronal spécifique à chaque tâche effectuée, selon la demande de la consigne confirme les études précédentes (Mack et *al.*, 2008) et contredit des résultats antérieurs selon lesquels la détection et l'identification d'un stimulus sont simultanés (Grill-Spector et Kanwisher, 2005). Il est intéressant de noter que ces deux réseaux peuvent différer dès le cortex occipital, c'est-à-dire dès l'étape de traitement visuel de bas niveau. Même s'il existe un réseau commun aux deux tâches, les différentes activations observées pour chacune d'elles suggèrent que la détection et la catégorisation ne sont pas sous-tendues par les mêmes circuits neuronaux. Comme nous avons pu l'observer lors d'une étude comportementale proposée à des participants sains (Article 1), la détection et la catégorisation ne reposent qu'en partie sur les mêmes processus, alors même que la tâche utilisée est identique et que seule la consigne est modifiée. Le recrutement du lobe occipital droit pour la détection et du lobe occipital gauche pour la catégorisation provient probablement de la modulation « *top-down* » venant de l'influence rétro-active des aires associatives sur les aires visuelles primaires (Corbetta et *al.*, 1990 ; Fink et *al.*, 2002).

2. Chez les patients hémianopsiques

2.1. Spécialisation hémisphérique

Nos résultats préliminaires mettent en avant qu'une lésion occipitale droite induit un déficit lors de la tâche avec la consigne de détection mais également lors de la catégorisation, alors qu'une lésion occipitale gauche génère principalement un déficit lors de la catégorisation. De plus, le champ visuel central et le champ visuel ipsilésionnel considérés comme intacts chez les patients hémianopsiques ne sont pas intégralement préservés, contrairement à ce qui a souvent été décrit. Récemment, il a été mis en évidence un réseau pariéto-frontal (impliqué dans le traitement visuo-spatial) plus important dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche, permettant d'expliquer la prépondérance de l'hémisphère droit chez le sujet normal ou cérébro-lésé (en particulier chez les patients héli-négligents) dans les processus d'organisation de l'espace. Nous observons le même type d'asymétrie dans nos propres résultats, à savoir de moins bonnes performances comportementales et des activations en IRMf plus bilatérales pour les patients cérébro-lésés droit (HLHg) par rapport aux patients cérébro-lésés gauche (HLHd). En outre, nous observons que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) sont plus lents que les témoins quel que soit le type de scène utilisé. Nos résultats corroborent ainsi l'hypothèse de Thiebaut de Schotten et *al.* (2011) selon laquelle la spécialisation hémisphérique des capacités visuo-spatiales serait associée à un déséquilibre du traitement visuospatial en faveur de l'hémisphère droit. Cependant, nous pouvons remarquer que de nombreuses études, étudiant la spécialisation hémisphérique suggèrent que ces effets sont très fins et difficilement reproductibles selon : la tâche, le paradigme, et les stimuli utilisés (Yovel et *al.*, 2011). Par exemple dans une méta-analyse de 10 études, Yovel et *al.* (2011) soulignent que la plupart des résultats sont équivoques, raison pour laquelle il est difficile d'observer des résultats permettant de supporter cette double dissociation (HD plus spécialisé dans le traitement de l'information globale, les cibles étant présentées dans le champ visuel gauche / HG plus spécialisé dans le traitement de l'information locale, les cibles étant présentées dans le champ visuel droit) (voir Chokron et *al.*, 2000 et Buchsbaum et *al.*, 2006). L'approche neuropsychologique, basée sur l'étude de patients cérébro-lésés et notamment de patients présentant une négligence spatiale unilatérale, permet de mieux comprendre la difficulté d'obtenir des résultats robustes et reproductibles. En effet, les patients souffrant d'une lésion hémisphérique droite présenteraient plus fréquemment une négligence

égocentrique (centrée sur le corps, donc dépendante de l'espace de présentation) alors que les formes de négligence allocentrique (centrée sur l'objet lui-même, sans effet du champ de présentation) seraient plus observées dans le cas de lésions hémisphériques gauches (Kleinman et *al.*, 2007) que droites (Hillis et *al.*, 2005). Les troubles observés chez ces patients suggèrent que l'hémisphère gauche traiterait la partie droite des objets, alors que l'hémisphère droit traiterait préférentiellement la partie gauche des objets, quel que soit le champ visuel de présentation. C'est pourquoi Christie, Ginsberg, Steedman, Fridriksson, Bonilha et Rorden, (2012) ont utilisé des stimuli hiérarchiques en variant l'information globale/locale à la fois au niveau du champ visuel de présentation et à l'intérieur même des stimuli. Ils ont alors observé que les contrôles sains sont meilleurs pour détecter l'information locale, située sur le côté droit d'un objet, que lorsque cette information est présentée dans le champ visuel droit. De plus, ils obtiennent de meilleures performances lorsque l'information globale est présentée dans le champ visuel gauche (par rapport à la condition où l'information globale est présentée sur le côté gauche de l'objet). Ces résultats permettent de nuancer les résultats décrits jusqu'à présent sur la spécialisation hémisphérique et le traitement visuel global/local.

2.2. Champ visuel sain des patients HLH

2.2.1. Effet d'une lésion occipitale droite (HLHg)

Comparés aux témoins, les patients cérébro-lésés droit (HLHg) font plus d'erreurs et sont plus lents pour traiter les basses fréquences spatiales dans leur champ visuel droit (correspondant à leur champ visuel sain). Ce résultat va dans le sens de notre hypothèse et souligne les répercussions d'une lésion droite sur le traitement des basses fréquences dans le champ visuel sain. Résultat contre-intuitif dans la mesure où l'on parle de « champ visuel sain », car même dans ce champ visuel considéré comme intact, les informations sont moins bien traitées. En effet, certains auteurs (Delis et *al.*, 1986) ont remarqué que les patients porteurs d'une lésion cérébrale droite rencontrent des difficultés dans le traitement global. Les patients cérébro-lésés droit/HLHg font également plus d'erreurs et sont plus lents pour traiter les hautes fréquences spatiales et les scènes non-filtrées, par rapport aux contrôles. On peut expliquer ce résultat en se basant sur les observations de Grabowska, Semenza, Denes et Testa (1989), selon lesquelles une lésion droite peut avoir des effets

délétères à la fois au niveau du traitement des hautes et des basses fréquences spatiales. Le cortex visuel droit semble donc être impliqué à la fois dans le traitement des hautes et des basses fréquences spatiales. De plus, Peyrin et *al.*, (2006b), ont observé une certaine dynamique de cette spécialisation hémisphérique des fréquences spatiales. En effet le temps de présentation des scènes influence ce phénomène de spécialisation. Lorsque le temps de présentation est de 150 ms, ces auteurs observent un avantage de l'hémisphère droit pour l'ensemble des fréquences spatiales. Ici, nous observons chez ces patients cérébro-lésés droit (HLHg) une gêne dans le traitement à la fois des hautes et des basses fréquences spatiales avec un temps de présentation de 100ms. Il semblerait donc que, lorsque le temps de présentation est de 100ms, le cortex visuel droit soit spécialisé à la fois dans le traitement des hautes et des basses fréquences spatiales.

2.2.2. Effet d'une lésion occipitale gauche (HLHd)

Comparés aux témoins, les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) font particulièrement plus d'erreurs pour traiter les hautes fréquences spatiales. Dans le CV gauche (sain pour ces patients) : les patients traitent aussi bien que les contrôles les BFS et les scènes non-filtrées. Par conséquent, le traitement des scènes dans le champ visuel gauche n'est pas perturbé. Rappelons que les informations présentées dans le CV gauche sont traitées majoritairement par l'hémisphère droit (sain chez ces patients) qui conserve son rôle prépondérant dans l'analyse visuo-spatiale comme chez les participants sains. En revanche les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) font plus d'erreurs que les contrôles pour traiter les HFS. Comme nous l'avons vu, les HFS sont préférentiellement traitées par l'hémisphère gauche qui dans ce cas est lésé. Par conséquent, ce résultat qui s'appuie sur une approche neuropsychologique, apporte des arguments en faveur de la spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement des HFS. De plus les patients obtiennent des temps de réponse plus courts pour traiter les BFS par rapport aux HFS dans le champ visuel gauche. Ce résultat souligne le fait que ces patients conservent une spécialisation hémisphérique dans le champ visuel sain.

2.2.3. Impact de la latéralisation de la lésion

Nous remarquons que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) font plus d'erreurs et sont moins rapides que les patients cérébro-lésés gauche (HLHd). Grabowska et *al.*, (1989) ont observé chez des patients cérébro-lésés droit et gauche, lors d'une tâche de discrimination

de réseaux (en HFS et BFS) que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) font plus d'erreurs de discrimination que les patients cérébro-lésés gauche (HLHd). Ce résultat suggère qu'une lésion du cortex visuel primaire droit entraînerait plus de difficulté dans le traitement des fréquences spatiales, qu'une lésion gauche.

Malgré des performances affaiblies par rapport aux témoins, les patients hémianopsiques (aussi bien droit que gauche) obtiennent un profil comparable à celui obtenu par les contrôles dans le champ visuel sain : les BFS sont aussi bien traitées que les scènes non-filtrées, et les BFS sont mieux traitées que les HFS.

Discutons à présent l'effet de la latéralisation de la lésion et des troubles de l'analyse visuelle dans le champ central des patients hémianopsiques.

2.3. CV central des patients HLH

Concernant les performances obtenues en champ central (champ considéré comme intact), lors de la tâche avec la consigne de détection, les patients cérébro-lésés droit (HLHg) obtiennent de moins bonnes performances (taux d'erreurs plus importants et temps de réponse plus lents) par rapport aux témoins et par rapport aux patients cérébro-lésés gauche (HLHd), quelles que soient les fréquences spatiales à traiter. Concernant la catégorisation, les patients cérébro-lésés droit (HLHg) obtiennent de moins bonnes performances que les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) et que les contrôles pour les images non filtrées et filtrées en HFS. Par ailleurs, les deux groupes de patients cérébro-lésés gauche (HLHd) et cérébro-lésés droit (HLHg) sont ralentis par rapport aux contrôles (Cavézian *et al.*, 2010). De plus, les données acquises en IRMf mettent en évidence une activation différente selon la latéralisation de la lésion corroborant les données observées lors de la tâche comportementale (hors IRM). En effet, nous observons une activation au niveau de l'hémisphère sain chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) et une activation bilatérale chez les patients cérébro-lésés droit (HLHg) et ce, quelle que soit la consigne, contrairement aux contrôles qui obtiennent un pattern d'activation spécifique selon la consigne donnée. Chez les contrôles, les aires visuelles s'activent de manière bilatérale au décours de la détection alors que l'activation est plus marquée à gauche lors de la catégorisation. Autrement dit, les patients ont les mêmes activations quelle que soit la consigne donnée, perdant ainsi la spécificité de la tâche.

En résumé, le traitement de scènes naturelles est perturbé chez les patients hémianopsiques. D'une part, les patients cérébro-lésés droit (HLHg) semblent plus gênés avec des TR globalement plus ralentis dès les tâches de détection. D'autre part, les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) sont aussi rapides que les participants contrôles en détection, mais sont ralentis en catégorisation.

Les résultats relatifs au traitement des FS, dans cette étude, rejoignent partiellement ceux de la littérature. Il existe un biais *coarse-to-fine* en détection, chez les sujets contrôles, mais ce biais disparaît en catégorisation. Les profils de réponse des patients cérébro-lésés droit (HLHg) ne vont pas dans le sens d'une spécialisation hémisphérique pour le traitement des FS. Par contre, l'augmentation du biais *coarse-to-fine*, en catégorisation chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd), va dans le sens d'une spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement des HFS. Il serait intéressant de tester des sujets plus jeunes, car ces résultats mitigés pourraient en partie s'expliquer par l'âge des patients. En effet, selon le modèle HAROLD (hemispheric asymmetry reduction in older adults), la spécialisation hémisphérique observée dans des tâches cognitives impliquant le cortex préfrontal, diminue avec l'âge (Cabeza, 2002 ; Dolcos, Rice et Cabeza, 2002). Nous pouvons supposer que le même phénomène existe au niveau postérieur.

2.3.1. Effet de la consigne

La tâche réalisée avec la consigne de détection et de catégorisation d'images de scènes naturelles a également été utilisée pour évaluer l'effet de la charge cognitive chez des participants contrôles et les patients hémianopsiques. Globalement, les résultats montrent que selon la consigne donnée, la tâche ne suscite pas le même pattern d'activation cérébrale (bien que se chevauchant) chez les participants contrôles. De plus, les données chez les patients hémianopsiques soulignent qu'une lésion occipitale unilatérale modifie le traitement visuel dans le champ visuel central, aussi bien au niveau des performances comportementales que de la réorganisation au niveau du lobe occipital qui semble dépendre de la latéralisation de la lésion.

2.3.2. Intégrité du champ central ?

Globalement, les résultats chez les patients mettent en évidence qu'une lésion unilatérale occipitale, droite ou gauche, modifie le traitement visuel dans le champ visuel central.

Cette hypothèse va dans le sens d'études récentes montrant que l'hémianopsie, indépendamment de ses caractéristiques cliniques (c'est-à-dire : la présence d'épargne maculaire ou non, la localisation de la lésion ou son étendue...) ne peut pas se résumer à une simple perte du champ visuel contralésionnel. En effet, elle est associée à un déficit visuel au niveau du champ visuel central (Cavézian et *al.*, 2010) ainsi qu'au niveau du champ ipsilésionnel (Paramei et Sabel, 2008). Comme nous l'avons évoqué, les propriétés rétiniotopiques du système visuel sont telles que la zone de la vision en champ central est représentée sur une partie très étendue de l'aire visuelle primaire, par rapport à la zone responsable du traitement du champ visuel périphérique (Wandell et *al.*, 2007). L'hémichamp central gauche est traité par l'hémisphère droit et inversement. Cependant ce dernier résultat, concernant l'atteinte du traitement visuel au niveau du champ central chez les patients HLH à la suite d'une lésion occipitale unilatérale, va plutôt dans le sens des observations de certains auteurs (Fendrich, Gazzaniga, 1989 ; McFadzean, Brosnahan, Hadley, Mutlukan, 1994) pour qui le champ central (la fovéa) est représentée de manière unilatérale au niveau du cortex visuel primaire. A l'inverse, cette observation ne soutient pas le postulat selon lequel le champ central serait représenté de manière bilatérale, au sein de chaque hémisphère, en raison de l'existence d'une épargne maculaire dans certains cas de lésion occipitale unilatérale (Huber, 1970 ; voir pour revue Brysbaert, 2004).

En observant les données cliniques des patients et en calculant le volume des lésions ainsi que leurs topographies, nous pouvons admettre qu'il existe un effet de la latéralisation de la lésion dès le cortex visuel primaire.

Les différences obtenues entre les performances comportementales des patients cérébro-lésés droit (HLHg) et cérébro-lésés gauche (HLHd), sont en faveur de notre hypothèse sur la spécialisation hémisphérique. Sur la base de cette observation, nous avons décidé de poursuivre les investigations à l'aide d'imagerie cérébrale. Utiliser l'IRMf nous permettait ainsi de vérifier si cette différence comportementale s'accompagnait d'une réorganisation cérébrale selon la latéralisation de la lésion, expliquant la différence obtenue sur le plan comportemental. C'est ce que nous discutons à présent de manière plus détaillée.

2.3.3. Spécialisation hémisphérique et réorganisation corticale

Nous observons l'existence d'un profil différent chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) et cérébro-lésés droit (HLHg). Comme mentionné ci-dessus, chez les participants sains le gyrus occipital inférieur droit est activé lors de la détection, alors que le gyrus occipital médian gauche est préférentiellement engagé lors de la catégorisation. Sur la base de ces observations, on s'attend à ce que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) soient perturbés uniquement lors de la détection puisque l'hémisphère droit est activé lors d'une tâche de détection. Or non seulement ils sont gênés en détection mais également en catégorisation.

Conformément aux études antérieures (Peyrin et *al.*, 2006b), bien que les patients (à la fois HLHg et HLHd) obtiennent de moins bonnes performances pour la catégorisation, les patients cérébro-lésés droit (HLHg) obtiennent également des performances déficitaires pour la détection. Néanmoins, il semble difficile de concevoir qu'ils puissent être en mesure de catégoriser un stimulus s'ils n'ont pas pu le détecter correctement. Cependant ce résultat va dans le sens de ceux observés par Mack et *al.*, (2008), qui avancent l'idée que les capacités de détection et de catégorisation reposent sur des processus différents. Conformément aux données comportementales, les données d'imagerie ont révélé chez les patients une perte de spécificité de l'activation pour chaque tâche demandée *via* la consigne (par opposition aux participants sains chez qui on observe une activation différente en fonction de la consigne donnée). Globalement, ces résultats suggèrent que les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) peuvent activer un réseau cortical permettant la réalisation d'une tâche simple de détection (mais pas de catégorisation), tandis que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) ne parviennent pas à activer le réseau permettant la réalisation correcte pour la réalisation de la détection ou de la catégorisation. En accord avec la modulation *top-down* (*e.g.*, Corbetta et *al.*, 1990), nos résultats suggèrent qu'une lésion occipitale empêche les aires associatives d'orienter correctement leur traitement au niveau du lobe occipital et supprime l'activation spécifique selon la tâche demandée (contrairement aux participants sains).

En outre, la perte d'activité corticale spécifique selon la consigne donnée, chez les patients, et ce quel que soit le côté de la lésion, souligne que leur activation résulte plus des aspects physiques de la tâche (car la tâche utilisée est la même, seule la consigne donnée

verbalement diffère) et non (comme on le voit chez les témoins sains) du processus cognitif induit par la consigne spécifique verbale.

De cette façon, l'absence d'effet spécifique de la consigne sur l'activité corticale suggère une réponse plutôt « passive » visuelle par rapport à des participants sains dont l'activation corticale est sensible à la consigne. Enfin, la différence observée en fonction de la latéralisation de la lésion occipitale est en accord avec l'hypothèse sur l'asymétrie hémisphérique suggérée précédemment pour les facteurs perceptifs purs, tels que les fréquences spatiales (Peyrin et *al.*, 2004 ; Peyrin et *al.*, 2006b ; Cavézian et *al.*, 2010).

2.3.4. Réorganisation corticale et latéralisation de la lésion

Nos résultats mettent également en évidence la prédominance de l'activation de l'hémisphère droit chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) et une activation bilatérale chez les patients cérébro-lésés droit (HLHg). Une telle différence soulève la question de la réorganisation corticale chez les patients souffrant d'une lésion occipitale droite ou gauche. On peut penser qu'il existe une réorganisation préférentiellement intra-hémisphérique chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd), et inter-hémisphérique à la suite d'une lésion occipitale droite (HLHg). Bien que ces résultats soient cohérents avec certaines études antérieures faisant état d'une réorganisation intra-hémisphérique et / ou inter-hémisphérique chez des patients hémianopsiques (Silvanto et *al.*, 2007 ; Bridge et *al.*, 2008), il semblerait, sur la base de nos résultats, que les deux types de réorganisation dépendent du côté de la lésion occipitale. Nos résultats vont dans le sens de l'approche classique de la spécialisation hémisphérique. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, de nombreuses études ont démontré la dominance de l'hémisphère droit dans le traitement visuo-spatial (Heilman et Van Den Abell, 1980). Nous connaissons également les capacités du cortex pariétal droit à assumer la plupart des fonctions visuelles du cortex pariétal gauche. Ainsi, on peut supposer que le cortex occipital droit soit en mesure d'assumer une partie du traitement visuo-spatial normalement accompli par le cortex occipital gauche. Conjointement à cela, le lobe occipital gauche -en raison de la prédominance hémisphérique gauche pour le traitement du langage-, pourrait ne pas être capable de prendre en charge le traitement visuo-spatial normalement géré par le lobe occipital droit. Une lésion occipitale gauche engendrerait une activation plus marquée au niveau de l'hémisphère droit (comme pour compenser la « perte » de traitement visuo-spatial normalement pris en charge par le lobe occipital gauche, ici lésé), alors qu'une

lésion occipitale droite conduirait à la sollicitation d'un réseau plus étendu impliquant les deux hémisphères dans le but de compenser la « perte » de traitement visuo-spatial normalement pris en charge par le lobe occipital droit.

Dans l'ensemble, la différence entre les patients souffrant d'une lésion occipitale droite ou gauche soulève plusieurs questions. Avant toute chose, il semble primordial de reconsidérer certaines études qui comportent des biais méthodologiques. A titre d'exemple, certains auteurs ont créé un groupe de patients hémianopsiques droit « artificiel » en renversant simplement sur le plan sagittal les images obtenues en IRMf chez des patients hémianopsiques gauche, afin que tous les patients aient leur lésion du même côté sur les images (Nelles et *al.*, 2007). Une telle procédure pour analyser les données IRMf peut être controversée sur la base de nos propres observations. Pour rappel, il existe une différence d'activations cérébrales entre les patients cérébro-lésés droit et gauche (HLHg et HLHd) et ce dès la région occipitale.

Lorsque le champ visuel sain (ipsilésionnel) est stimulé, il n'existe pas de différence entre les performances obtenues par les patients (HLHg et HLHd) et celles des contrôles (ceci à la fois pour les taux d'erreurs et les temps de réponse) en détection. Il serait intéressant de mener cette étude chez les patient HLH en champs latéralisés, sous IRMf afin d'observer les substrats impliqués lors de ce traitement. En revanche, en catégorisation (en champ central), les patients cérébro-lésés droit (HLHg) obtiennent des réponses moins précises et plus lentes que les contrôles tout en obtenant un pattern d'activation comparable aux contrôles. Par conséquent, ce résultat remet en question le lien direct entre les activations cérébrales et les performances. Ces résultats mettent également en évidence, que la nature des stimuli (scènes naturelles visuelles complexes impliquant préférentiellement l'hémisphère droit plus spécialisé dans le traitement visuel) prime sur la nature de la tâche demandée. Les résultats comportementaux mettent en évidence chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) un déficit spécifique lors du traitement des HFS et un déficit un peu plus marqué pour le traitement des BFS chez les patients cérébro-lésés droit (HLHg).

Pour terminer cette discussion sur la latéralisation de la lésion, notons que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) obtiennent de moins bonnes performances que les contrôles et ce, même dans le CV sain, à la fois pour les BFS, HFS et NF. Les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) sont gênés, quant à eux, principalement pour le traitement des HFS par rapport aux contrôles. Nous pouvons ainsi émettre l'hypothèse qu'une lésion du cortex

visuel primaire droit a des répercussions plus néfastes sur le traitement des fréquences spatiales qu'une lésion gauche. On remarque que les patients cérébro-lésés droit (HLHg) rencontrent des difficultés pour traiter les scènes à la fois dans leur CV sain et aveugle, alors que les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) parviennent à traiter les scènes dans leur CV sain de façon identique à celle des contrôles.

2.4. Champ visuel aveugle

Discutons dès à présent les performances obtenues dans le champ visuel amputé.

2.4.1 *Blindsight*, effet de la latéralisation de la lésion ?

Lorsque nous comparons chez les patients hémianopsiques la tâche réalisée avec la consigne de détection et de catégorisation qui constitue notre tâche de choix forcé, on peut alors répondre à notre question qui était la suivante : est-ce que les performances obtenues lors de la catégorisation de scènes naturelles peuvent être meilleures que les performances de détection révélant ainsi un phénomène de *blindsight* ? Comme nous l'avons évoqué, lorsque les patients hémianopsiques sont « forcés » à traiter un stimulus visuel apparaissant dans leur champ aveugle, ils obtiennent des performances surprenantes, bien au dessus du seuil du hasard malgré le fait qu'ils soient inconscients de la présence même d'une cible dans leur CV. Les patients hémianopsiques font preuve de capacités visuelles résiduelles dans leur CV aveugle, en deçà du seuil du hasard pour la catégorisation (choix forcé). On note ce phénomène de *blindsight* principalement chez les patients cérébro-lésés gauche (HLHd). Il semble être spécifique au traitement des BFS, ce qui pourrait sous-entendre que les scènes sont traitées de manière inconsciente, par une voie résiduelle, sous-corticale, qui véhiculerait les BFS.

De plus, nous remarquons que dans leur champ visuel aveugle les patients font moins d'erreurs pour traiter les BFS que les HFS ; les temps de réponse sont également plus courts pour traiter les BFS que les HFS. De plus les temps de réponse pour traiter les BFS sont plus rapides dans le CV aveugle que dans le CV sain. Ce résultat va à nouveau dans le sens de l'hypothèse selon laquelle le *blindsight* serait véhiculé par un réseau secondaire impliquant la voie magnocellulaire spécialisée dans le traitement des BFS. Par ailleurs, les patients sont aussi rapides pour donner une réponse dans leur champ visuel central que leur

CV sain ou encore aveugle, soulignant ainsi le fait qu'ils parviennent à traiter aussi vite en choix forcé dans leur champ visuel aveugle, bien qu'ils n'aient pas conscience du stimulus traité.

2.4.2. Effet de la consigne

Lors de la tâche avec la consigne de détection, les performances obtenues par les patients sont sans surprise, à savoir plus ralenties et en dessous du seuil de hasard (réponse donnée au hasard dans le champ visuel aveugle). Ce résultat est en corrélation avec les performances obtenues à la périmétrie automatisée (Humphrey) et confirme bien que les patients HLH ne perçoivent pas dans leur CV aveugle. Lors de la catégorisation (qui constitue notre tâche en choix forcé, sollicitant les capacités de *blindsight*) tous les patients obtiennent certes des performances moins précises que les contrôles, mais les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) obtiennent des performances situées au-dessus du seuil du hasard, soulignant l'existence de *blindsight*. Ces performances ne sont pas reproduites par les patients cérébro-lésés droit (HLHg). Pour comprendre ces différences entre nos deux groupes de patients, voici quelques données préliminaires obtenues récemment lors d'une étude menée en IRMf. Sur la figure 73 ci-après, nous remarquons que le patient cérébro-lésé gauche (HLHd) présente une activation au sein de son hémisphère lésé lorsque l'on compare la catégorisation vs détection dans le champ droit amputé, alors que le contraste inverse détection vs catégorisation dans le champ visuel droit ne met pas en évidence d'activation du tout. Soulignant probablement l'effet de la consigne, en fonction de la tâche demandée le patient ne sollicite probablement pas les mêmes circuits neuronaux.

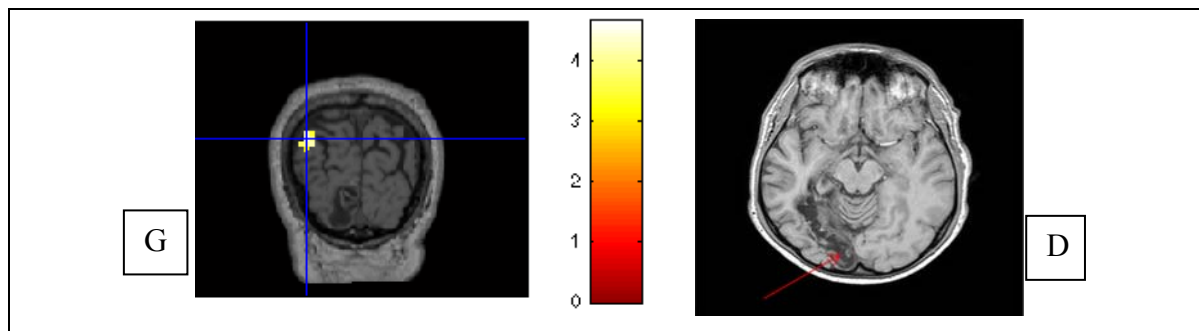


Figure 73 : Présentation de résultats récents, obtenus lors d'une étude préliminaire. A gauche, activation obtenue à l'aide du contraste catégorisation versus détection dans le champ visuel droit aveugle. $T=3.11$, $p<0.001$ non corrigé, 5 voxels. A droite IRM anatomique, coupe axiale, présentant la lésion occipitale gauche, chez un patient HLHd. La gauche est à gauche, la droite à droite.

2.4.3. Spécialisation hémisphérique

Les performances obtenues par les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) lors de la présentation des scènes dans le champ aveugle mettent en évidence un traitement des fréquences spatiales allant dans le sens de l'hypothèse de la spécialisation hémisphérique. Ces patients obtiennent des performances moins précises lors du traitement des HFS par rapport aux BFS et aux scènes non-filtrées. Ce résultat permet de supposer que les patients cérébro-lésés gauche (HLHd) souffrant d'une lésion de l'hémisphère gauche (hémisphère gauche spécialisé dans le traitement des BFS) et notamment des aires visuelles primaires gauches, ont un déficit pour le traitement des HFS. Le traitement préférentiel des fréquences spatiales (selon la spécialisation hémisphérique : HD plus spécialisé dans le traitement des BFS et HG plus spécialisé dans le traitement des HFS) serait préservé chez ces patients dans l'hémichamp aveugle, malgré un traitement inconscient.

Globalement, les résultats présentés précédemment, lors d'études en champ central et en champ latéralisés mettent en évidence que l'hémianopsie consécutive à une lésion post-chiasmatique est associée à un déficit des processus de détection ou de catégorisation selon la latéralisation de la lésion. Une lésion des aires visuelles droite induit un déficit lors de la détection mais aussi de la catégorisation, alors qu'une lésion des aires visuelles gauche induit majoritairement un déficit lors de la catégorisation. De plus, le champ visuel central et le champ visuel non amputé considérés comme intacts chez les patients HLH ne sont pas autant préservés que ce qui est souvent admis. Ainsi la mise en place d'une rééducation adaptée pour les patients HLH, nécessitera également un entraînement du champ visuel central et du champ visuel « sain » en plus de la stimulation du champ aveugle.

3. Prise en charge

Sur la base de nos résultats, il semble important de stimuler le champ visuel central et le champ visuel « sain » en plus du champ aveugle. Il est également primordial de considérer l'effet de la demande de la tâche sur les performances obtenues par les patients et ainsi les pousser à réaliser une tâche visuelle de haut niveau cognitif.

Finalement, il est difficile de définir et de bien cerner le phénomène de *blindsight*. En effet, il reste toujours un sujet de débat. De nombreux facteurs sont à considérer pour expliquer

les différences observées chez les patients, tels que la variabilité inter-individuelle, l'âge des patients, le délai post-lésionnel, la taille de la lésion, l'étiologie... Cependant des études sur le *blindsight* suggèrent que celui-ci n'est pas un processus uniquement inconscient (Overgaard, Fehl, Mouridsen, Bergholt et Cleeremans, 2008). Weiskrantz emploie le terme de « *degraded normal vision* » [vision normale dégradée] et Silvanto, quant à lui, parle de « *blindsighted see* » [qu'on pourrait traduire par vision aveugle voyante]. Comme décrit précédemment, Silvanto et al. (2007) ont démontré qu'une perception consciente est possible dans le champ considéré comme aveugle. La réorganisation corticale n'est pas systématiquement associée à une amélioration du champ visuel (comme cela a été objectivé à l'aide d'une périmétrie ; Raninen et al. 2006). Comme l'ont évoqué Ro et Rafal (2006), la vision peut devenir consciente dans le champ visuel aveugle. De plus, nous montrons lors de l'article 4, une amélioration du champ visuel (mesuré à l'aide d'une périmétrie automatisée) à la suite d'un entraînement visuel intensif. Pour conclure, les séances de stimulation vouées à « forcer » les patients à utiliser leurs capacités de *blindsight*, leur permet, d'accéder à une vision consciente dans leur champ aveugle. Nous devrions probablement prendre en considération toutes ces informations et changer la définition de l'hémianopsie, afin de cesser de considérer ce trouble visuel comme permanent et irréversible.

Il paraît crucial de poursuivre ces études et de collecter davantage de données sur ce sujet, afin de confirmer nos résultats qui vont dans le sens d'une possible restauration du champ visuel. Il serait également opportun de standardiser les évaluations du *blindsight* ainsi que l'entraînement visuel du champ aveugle, dans le but de fournir par la suite aux patients un pronostic de récupération en fonction des facteurs énumérés précédemment, à savoir l'âge du patient, la taille et la localisation de la lésion, l'étiologie, le délai post-lésionnel etc...

La récupération au niveau du champ visuel aveugle pourrait s'expliquer, comme cela a été suggéré par des études récentes, par la présence d'une boucle rétro-active venant des aires corticales extra-striées et allant vers les îlots corticaux épargnés au niveau du cortex visuel primaire lésé (Silvanto, Lavie et Walsh, 2005). Cela pourrait également s'expliquer par l'implication des aires visuelles au niveau de l'hémisphère sain (Silvanto, Cowey, Lavie et Walsh, 2007 ; Bridge et al., 2008).

4. Remise en question de la réorganisation

Nous vivons dans une société basée sur la vision. L'information visuelle nous aide à nous orienter dans notre environnement, à identifier les objets de notre environnement, à orienter notre attention sur des événements importants, à nous engager dans des interactions sociales. Notre vision nous permet de fonctionner efficacement dans la vie quotidienne. Ainsi, la perte de cette modalité sensorielle diminue la qualité de vie et représente un sérieux défi dans la vie de tous les jours, et nécessite une réorganisation de tout le fonctionnement qui concerne des dizaines de millions de personnes dans le monde (Organisation mondiale de la Santé, Fiche d'information no. 282, mai 2009, par exemple, 314 millions de personnes souffrent de déficience visuelle dans le monde entier ; Rapport de l'OMS 2009 Fiche, n ° 282).

A ce jour, les techniques de réhabilitation les plus couramment utilisées pour les patients malvoyants sont des aides telles que la lecture en braille, des aides à la locomotion comme les cannes, ou des dispositifs plus contemporains tels que des détecteurs d'obstacles, cannes laser, ultrasons. Mais toutes ces aides sont efficaces lorsque la perte de la vision est d'origine périphérique (lorsque celle-ci concerne le système visuel depuis l'œil jusqu'au chiasma inclus, sur l'anatomie du système visuel).

De nos jours, il est très rare qu'une prise en charge soit proposée pour des troubles visuels à la suite d'une lésion d'origine cérébrale, alors même que plus de 20% du cortex cérébral est consacré à l'analyse de l'information visuelle. De plus en plus, ces aires « sensorielles » considérées comme unimodales, sont vues comme pluri-sensorielles, ce qui laisse des ouvertures dans le domaine de la rééducation (Beauchamp et *al.*, 2004 ; Calvert 2001 ; Cappe et Barone 2005 ; Schroeder et Foxe 2005). Lorsqu'une rééducation est proposée il est important de bien cerner l'étiologie et la localisation de la lésion (périphérique ou centrale) car la prise en charge n'est pas la même selon l'origine (rétinienne ou corticale) du déficit visuel. En effet, le cortex occipital sain chez les aveugles est capable de fonctionner et de prendre en charge une autre modalité sensorielle. Ceci n'est pas le cas des patients HLH chez qui le cortex occipital est lésé. Par conséquent il ne possède pas la capacité de traiter une autre modalité sensorielle du fait de la lésion cérébrale. Il est donc nécessaire de ne pas proposer la même rééducation que celle proposée aux aveugles, dans le cas d'une lésion centrale. En effet Pascual-Leone et *al.*, (2005) ont décrit une incapacité à lire le braille à la suite d'une lésion occipitale bilatérale, accentuant l'idée que le cortex

visuel peut prendre en charge d'autres informations sensorielles que les informations visuelles (voir pour revue Sathian et Lacey, 2007).

Récemment, Plow et al, (2012) ont proposé un entraînement visuel durant 3 mois (ils ont proposé la technique VRT détaillée lors du chapitre abordant la rééducation) à deux patients souffrant d'une lésion occipitale gauche (HLHd). Ils ont couplé des séances de rééducation avec de la stimulation magnétique transcrânienne (TMS). Un patient recevait de « vrais champs magnétiques » durant l'entraînement visuel et l'autre avait des « schams » (des leurres). Ils ont observé une meilleure récupération pour le patient qui recevait de la TMS par rapport à celui qui avait des shams. Ils ont également constaté, à l'aide de l'IRMf une activation péri-lésionnelle ainsi que des aires visuelles associatives de manière bilatérale. Ce résultat confirme de manière indirecte l'intérêt d'utiliser des tâches de haut niveau cognitif telle que la catégorisation, pour entraîner les patients dans leur champ visuel aveugle afin de solliciter les aires visuelles associatives. Car ce type de tâches sollicite les aires visuelles associatives, apparemment toujours efficaces. D'autre part il semble intéressant de coupler la TMS avec la rééducation neurovisuelle.

Conclusions et perspectives

Bien que les patients présentés lors des études précédentes soient très similaires d'un point de vue fonctionnel et lésionnel, il paraît nécessaire de soumettre un plus grand nombre de participants neurologiquement sains et cérébro-lésés à ces protocoles expérimentaux afin de poursuivre l'étude complexe des phénomènes d'activation et de plasticité du système visuel en fonction de la nature précise des traitements à réaliser.

Nous avons peu de connaissances sur le lien entre les performances comportementales et les mécanismes de plasticité cérébrale, à la suite d'une lésion du système visuel périphérique (rétine, nerf optique, chiasma) ou central (aires visuelles corticales ou sous-corticales). Les résultats de notre étude en IRMf mettent en évidence des patterns d'activation cérébrale spécifiques (chez les participants sains, cérébro-lésés droit et gauche) associés à des patterns de performances comportementales spécifiques. Pourtant, cette étude ne permet pas la compréhension directe du lien entre la réorganisation corticale et la récupération de la fonction visuelle. Nos résultats soulèvent donc la question d'une différence au niveau des mécanismes de récupération entre les patients cérébro-lésés droit et gauche. Le dernier article présenté, met en évidence qu'une restauration du champ visuel chez les patients hémianopsiques peut être obtenue en stimulant le champ aveugle. Ceci en demandant au patient de détecter, discriminer et reconnaître des cibles visuelles présentées au niveau du champ visuel amputé [Article 4]. Nous avons maintenant besoin de comprendre si le pattern d'activation cérébrale lors de la phase aiguë peut prédire la récupération de la fonction visuelle. Nous avons également besoin de savoir quel type de réorganisation corticale a lieu chez les patients qui récupèrent après un entraînement visuel adapté.

Un tel sujet reste d'un point de vue fondamental très difficile à résoudre mais pourtant c'est une question très pertinente d'un point de vue clinique, d'une grande importance par rapport à la récupération des patients, étant donné le manque de connaissances sur le rôle de ces réorganisations cérébrales. Il serait donc intéressant de proposer une étude IRMf chez des patients HLH en phase aiguë et après rééducation lorsqu'ils ont récupéré en champ visuel, afin de mieux comprendre les substrats cérébraux qui sous-tendent cette récupération visuelle. Il faudrait également tester des patients HLH qui n'ont pas récupéré d'un point de vue comportemental afin de vérifier si la réorganisation corticale est la même ou pas.

Le cerveau a, comme nous l'avons vu dans la PARTIE 3, cette capacité à changer, s'adapter, à la suite d'une lésion cérébrale. Il serait intéressant de savoir maintenant si d'une part cette réorganisation cérébrale est stable dans le temps et d'autre part si elle est concomitante à une amélioration des performances comportementales.

Levin, Orlov, Dotan et Zohary (2006) ont montré chez des patients souffrant de névrite optique (NO), une absence d'activation de l'aire visuelle primaire correspondant rétinotopiquement à la partie du champ visuel atteint par la NO. Néanmoins, après une présentation d'objets et d'objets brouillés (*scrambled*), il existait tout de même chez ces patients des activations bilatérales du LOC (cortex occipital latéral, impliqué dans la reconnaissance des formes et des objets) comparables à celles des sujets contrôles, quel que soit l'œil stimulé et malgré l'absence d'activation du cortex visuel primaire (V1). Cette étude est en faveur d'une activation bilatérale du LOC même en l'absence d'activité corticale au niveau de V1 à la suite d'une atteinte du nerf optique. L'équipe de Jenkins quant à elle, a proposé que la plasticité cérébrale précoce après une NO puisse avoir lieu au niveau de la région du LOC et qu'elle soit corrélée à de meilleures performances visuelles en phase aiguë uniquement (Jenkins et *al.*, 2010). L'activité au niveau du LOC ne serait donc pas liée à l'interruption de l'influx visuel. Le LOC, même sans être directement lésé, semble donc être une structure capable de réorganisation corticale à la suite d'affections soudaines périphériques ou centrales du système visuel.

Levin et *al.* (2006) ont mis en évidence qu'une lésion du système visuel périphérique : NO, entraîne une réorganisation au niveau de l'aire visuelle primaire (V1) mais pas au niveau des aires associatives impliquées dans la reconnaissance des objets. Il serait intéressant de vérifier cela, chez les patients hémianopsiques ayant récupéré en champ visuel afin de connaître ou du moins, de mieux comprendre les aires corticales impliquées dans la récupération du champ visuel chez les patients HLH.

Cependant ceci est encore très discuté. En effet Raz et *al.* (2011) ont mis en évidence que les changements d'activation cérébrale ne reflètent pas systématiquement un phénomène de réorganisation corticale. Ils pourraient être simplement induits par le changement de quantité d'information visuelle qui parvient au cortex. Les modifications des patterns d'activation cérébrale observées pourraient être simplement le reflet des modifications du flux d'information visuelle reçu par les aires visuelles corticales.

Il serait donc intéressant d'étudier les capacités de *blindsight* selon le délai post-lésionnel, avec à l'appui des données comportementales ainsi qu'en neuro-imagerie fonctionnelle, afin de mieux comprendre pourquoi les capacités de *blindsight* changent avec le temps (Cowey, 2006), et savoir si elles changent grâce à la réorganisation corticale ou grâce à l'entraînement, ou à la suite simplement de modifications de perception visuelle ?

On peut également se poser la question de l'effet d'une lésion corticale sur la réorganisation des voies visuelles en avant de la lésion (dégénérescence rétrograde) jusqu'au système visuel périphérique. En effet, il faut considérer l'effet de la plasticité du système visuel d'un autre point de vue, et non pas dans l'unique sens de la conséquence d'une lésion du système visuel périphérique au niveau cérébral, mais également dans le sens d'une répercussion d'une lésion cérébrale tel qu'un AVC occipital, sur la réorganisation cellulaire du système visuel périphérique. Il serait intéressant d'étudier l'impact d'une lésion occipitale sur la réorganisation périphérique telle que les répercussions d'une HLH au niveau de la rétine ou du nerf optique. A l'aide de l'OCT (Tomographie Optique Cohérente) qui est un outil utilisé en ophtalmologie pour mesurer l'épaisseur de la cornée, de la rétine et du nerf optique, on a pu constater une diminution de l'épaisseur rétinienne maculaire qui correspond à l'HLH. On se demande si cette modification au niveau de la rétine, pourrait-être une réorganisation à la suite de l'amputation du champ visuel, du fait que l'information visuelle ne soit plus traitée dans un hémichamp. Certains auteurs ont abordé cette question auprès de vingt six macaques lésés de manière unilatérale au niveau de V1 ainsi que chez dix macaques sains. Ils ont observé huit ans après la lésion de l'aire visuelle primaire corticale une dégénérescence du corps genouillé latéral (Cowey et *al.*, 1989). De façon similaire, une dégénérescence des cellules ganglionnaires de la rétine à la suite d'une lésion du tractus optique a été observée (Cowey et *al.*, 2011).

Bullier et *al.* (1993) avait déjà mis en évidence chez le singe, que la proportion de cellule qui répond aux stimuli présentés dans le champ visuel amputé à la suite de l'ablation de V1 est très différente selon la région étudiée et par conséquent selon le type de stimuli utilisés. Ils ont mis en évidence que le mouvement d'une cible induit une activation de l'aire MT+ (correspond à V5 chez l'homme) dans les deux hémisphères, alors que la couleur induit une activation seulement au niveau de la voie ventrale dans l'hémisphère sain.

Ceci nous donne également une piste quant au matériel à utiliser durant la rééducation et notamment la restauration du champ visuel aveugle des patients hémianopsiques.

Pour conclure il serait intéressant de pouvoir établir un pronostic de récupération grâce à l'étiologie, à la latéralisation et au volume de la lésion, aux capacités comportementales et fonctionnelles des patients afin de pouvoir bien orienter la prise en charge du déficit visuel dans le but d'obtenir une récupération. Nous pourrions alors utiliser l'image de Baricco selon laquelle « *Dans les yeux des gens, on voit ce qu'ils verront, pas ce qu'ils ont vu* ». (Alessandro Baricco, extrait de *Novecento : pianiste*). Avant cela il nous reste encore de nombreuses études à réaliser et de nombreux mécanismes à comprendre. Il semble également, crucial, de considérer les troubles psychologiques engendrés par ce type de gêne visuelle (l'Hémianopsie Latérale Homonyme) et l'impact qu'elle peut avoir sur les interactions sociales. Dans le livre de Luria : « l'homme dont le monde part en éclat », un patient HLH décrit très bien son angoisse provoquée par la perception morcelée de son environnement et de son corps. On peut également comprendre l'urgence de l'évaluation systématique et de la prise en charge des troubles neurovisuels chez l'enfant. Ceci dans le but d'éviter une construction de soi morcelée, et des troubles importants du comportement.

Bibliographie

- Ali, M., Hazelton, C., Lyden, P., Pollock, A., & Brady, M. (2012). Recovery From Poststroke Visual Impairment : Evidence From a Clinical Trials Resource. *Neurorehabilitation and neural repair*.
- Amedi A, Jacobson G, Hendler T, Malach R, Zohary E (2002) Convergence of visual and tactile shape processing in the human lateral occipital complex. *Cereb Cortex*. Nov;12(11):1202-12.
- Amedi A, Raz N, Azulay H, Malach R, Zohary E (2010) Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans. *Restor Neurol Neurosci*;28(2):143-56.
- Badcock, J.C., Whitworth, F.A., Badcock, D.R., & Lovegrove, W.J. (1990). Low spatial frequency filtering and the processing of local-global stimuli. *Perception*, 19, 617-629.
- Bahrami, B., Lavie, N., & Rees, G. (2007). Attentional load modulates responses of human primary visual cortex to invisible stimuli. *Current biology*: CB, 17(6), 509–13.
- Barbur, J. L., Watson, J. D., Frackowiak, R. S., & Zeki, S. (1993). Conscious visual perception without V1. *Brain*: a journal of neurology, 116 (Pt 6, 1293–302.
- Barbur, J.L., Ruddock, K.H. & Waterfield, V.A. (1980). Human visual responses in the absence of the geniculo-calcarine projection. *Brain*, 103: 905-928.
- Barbur, J.L., Ruddock, K.H. & Waterfield, V.A. (1980). Human visual responses in the absence of the geniculo-calcarine projection. *Brain*, 103: 905-928.
- Barco, A., Bailey, C. H., & Kandel, E. R. (2006). Common molecular mechanisms in explicit and implicit memory. *Journal of neurochemistry*, 97(6), 1520–33.
- Basole, A., Kreft-Kerekes, V., White, L. E., & Fitzpatrick, D. (2006). Cortical cartography revisited: A frequency perspective on the functional architecture of visual cortex. *Progress in brain research*, 154, 121–34.
- Baxter LC, Saykin AJ, Flashman LA, et al. (2003) Sex differences in semantic language processing: a functional MRI study. *Brain Lang*;84:264-72.
- Bear, M.F., Connors, B.W. & al. (2002) Systèmes sensoriel et moteur. In Bear, M.F., Connors, B.W. & al. (Eds), *Neurosciences. A la découverte du cerveau*, 2^{ème} édition (pp. 262 – 511). Rueil-Malmaison : Pradel
- Behrmann, M., Marotta, J., Gauthier, I., Tarr, M. J., & McKeeff, T. J. (2005). Behavioral change and its neural correlates in visual agnosia after expertise training. *Journal of cognitive neuroscience*, 17(4), 554–68.
- Benson, D. F., Davis, R. J., & Snyder, B. D. (1988). Posterior cortical atrophy. *Archives of neurology*, 45(7), 789–93.
- Berardi, N., Pizzorusso, T., & Maffei, L. (2000). Critical periods during sensory development. *Current opinion in neurobiology*, 10(1), 138–45.

- Berardi, N., Pizzorusso, T., Ratto, G. M., & Maffei, L. (2003). Molecular basis of plasticity in the visual cortex. *Trends in neurosciences*, 26(7), 369–78.
- Bergsma, D. P., & van der Wildt, G. (2010). Visual training of cerebral blindness patients gradually enlarges the visual field. *The British journal of ophthalmology*, 94(1), 88–96.
- Bergsma, D. P., Elshout, J. A., van der Wildt, G. J., & van den Berg, A. V. (2008). Transfer effects of training-induced visual field recovery in patients with chronic stroke. *Topics in stroke rehabilitation*, 19(3), 212–25.
- Berlucchi S., Aglioti S. & Tassinari G. (1997). Rightward attentional bias and left hemisphere dominance in a cue target light detection task in callosotomy patient. *Neuropsychologia* 35, 941-952.
- Berson, D. M. (1988). Retinal and cortical inputs to cat superior colliculus: composition, convergence and laminar specificity. *Progress in brain research*, 75, 17–26.
- Beauchamp MS, Lee KE, Argall BD, Martin A. (2004) Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. *Neuron*.;41(5):809-23.
- Biederman, I., Rabinowitz, J. C., Glass, A. L., & Stacy, E. W. (1974). On the information extracted from a glance at a scene. *Journal of experimental psychology*, 103(3), 597–600.
- Blythe, I. M., Kennard, C., & Ruddock, K. H. (1987). Residual vision in patients with retrogeniculate lesions of the visual pathways. *Brain: a journal of neurology*, 110 (Pt 4, 887–905.
- Bolognini, N., Rasi, F., Coccia, M., & Làdavas, E. (2005). Visual search improvement in hemianopic patients after audio-visual stimulation. *Brain*: a journal of neurology, 128(Pt 12), 2830–42.
- Bosley TM, Dann R, Silver FL, Alavi A, Kushner M, Chawluk JB, Savino PJ, Sergott RC, Schatz NJ, Reivich M. 1987 Recovery of vision after ischemic lesions: positron emission tomography. *Ann Neurol*.21(5):444-50.
- Boucard CC, Hernowo AT, Maguire RP, Jansonius NM, Roerdink JB, Hooymans JM, Cornelissen FW. (2009). Changes in cortical grey matter density associated with long-standing retinal visual field defects. *Brain*;132:1898-1906.
- Boucart, M. & Hénaff, M.A. (Eds), Marseille, Editions Solal, 1998.
- Bourne, V.J. (2005). Lateralised processing of positive facial emotion: sex differences in strength of hemispheric dominance. *Neuropsychologia*, 43: 953-956.
- Bowers D, Heilman KM (1980) Pseudoneglect: Effects of hemispace on a tactile line bisection task. *Neuropsychologia* 18:491–498
- Boycott BB, Wässle H (1974) The morphological types of ganglion cells of the domestic cat's retina. *The Journal of Physiology*, 240(2): 397-419.
- Brazis, P. W., Lee, A. G., Graff-Radford, N., Desai, N. P., & Eggenberger, E. R. (2000). Homonymous visual field defects in patients without corresponding structural lesions

- on neuroimaging. *Journal of neuro-ophthalmology*®: the official journal of the North American Neuro-Ophthalmology Society, 20(2), 92–6.
- Bremmer, F., Schlack, A., Shah, N. J., Zafiris, O., Kubischik, M., Hoffmann, K., Zilles, K., et al. (2001). Polymodal motion processing in posterior parietal and premotor cortex: a human fMRI study strongly implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron*, 29(1), 287–96.
- Bridge, H., Thomas, O., Jbabdi, S. & Cowey, A. (2008). Changes in connectivity after visual cortical brain damage underlie altered visual function. *Brain*, 131, 1433-1444.
- Broadbent, D. E. (1958). Perception and communication. New York: Oxford University Press.
- Brysbaert, M. (2004). The importance of interhemispheric transfer for foveal vision: a factor that has been overlooked in theories of visual word recognition and object perception. *Brain and language*, 88(3), 259–67.
- Buchsbaum MS , Buchsbaum BR , Chokron S, Tang C, Wei T, (2006), Thalamocortical circuits: fMRI assessment of the pulvinar and medial dorsal nucleus in normal volunteers. *Neuroscience Letters*, 404(3):282-7.
- Bullier, J. (1998). Architecture fonctionnelle du système visuel. In M. Boucart, M. A. Hénaff & C. Belin (Eds.), *Vision : aspects perceptifs et cognitifs* (pp. 11-42). Cahors: SOLAL.
- Bullier, J. (2001). Integrated model of visual processing, *Brain Research, Rev*, 36(2-3), 96-107.
- Burgess, A. P., & Ali, L. (2002). Functional connectivity of gamma EEG activity is modulated at low frequency during conscious recollection. *International journal of psychophysiology*®: official journal of the International Organization of Psychophysiology, 46(2), 91–100.
- Burke, W. (1999). Psychophysical observations concerned with a foveal lesion (macular hole). *Vision research*, 39(14), 2421–7.
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychology Aging*, 17(1): 85-100.
- Cabeza, R., Anderson, N.D., Locantore, J.K. & McIntosh, A.R. (2002). Aging gracefully: compensatory brain activity in high performing older adults. *Neuroimage*. 17 (3): 1394-1402.
- Cabeza, R., Daselaar, S.M., Dolcos, F., Prince, S.E., Budde, M. & Nyberg, L. (2004). Task-independent and task-specific age effects on brain activity during work memory, visual attention and episodic retrieval, *Cerebral Cortex*.
- Calautti, C., Leroy, F., Guincestre, J. Y., & Baron, J. C. (2001). Dynamics of motor network overactivation after striatocapsular stroke: a longitudinal PET study using a fixed-performance paradigm. *Stroke; a journal of cerebral circulation*, 32(11), 2534–42.

- Caldara R, Schyns P, Mayer E, Smith ML, Gosselin F, Rossion B.(2005). Does prosopagnosia take the eyes out of face representations? Evidence for a defect in representing diagnostic facial information following brain damage. *J Cogn Neurosci*. 17(10):1652-66.
- Calvert GA, Hansen PC, Iversen SD, Brammer MJ. (2001) Detection of audio-visual integration sites in humans by application of electrophysiological criteria to the BOLD effect. *Neuroimage*.14(2):427-38.
- Camus J.F. (1998). Neuropsychologie de l'attention : l'apport des réseaux attentionnels neurocérébraux, vol. 8, n°1, 25-51.
- Capotosto, P., Babiloni, C., Romani, G. L., & Corbetta, M. (2009). Frontoparietal cortex controls spatial attention through modulation of anticipatory alpha rhythms. *The Journal of neuroscience*: the official journal of the Society for Neuroscience, 29(18), 5863–72.
- Cappe C, Barone P. (2005) Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey. *Eur J Neurosci*. 22(11):2886-902.
- Cardebat, D., Démonet, J.-F., De Boissezon, X., Marie, N., Marié, R.-M., Lambert, J., Baron, J.-C., et al. (2003). Behavioral and neurofunctional changes over time in healthy and aphasic subjects: a PET Language Activation Study. *Stroke; a journal of cerebral circulation*, 34(12), 2900–6.
- Cardin, V., Smith, A. T. (2011). Sensitivity of human visual cortical area V6 to stereoscopic depth gradients associated with self-motion. *Journal of neurophysiology*, 106(3), 1240–9.
- Cavézian C, Gaudry I, Perez C, Coubard O, Doucet G, Peyrin C, Marendaz C, Obadia M, Gout O, Chokron S. Specific impairments in visual processing following lesion side in hemianopic patients. *Cortex* 2010;46:1123-1131.
- Chédru, F., Leblanc, M., & Lhermitte, F. (1973). Visual searching in normal and brain-damaged subjects (contribution to the study of unilateral inattention). *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 9(1), 94–111.
- Chino, Y. M., Smith, E. L., Kaas, J. H., Sasaki, Y., & Cheng, H. (1995). Receptive-field properties of deafferentated visual cortical neurons after topographic map reorganization in adult cats. *The Journal of neuroscience*: the official journal of the Society for Neuroscience, 15(3 Pt 2), 2417–33.
- Chokron S (2011) La négligence spatiale unilatérale. EMC Ophtalmologie, Elsevier, (sous presse).
- Chokron S (2002). Les troubles neurovisuels d'origine centrale. p172-179. Traité de Neuro-Ophtalmologie Clinique, Paris: Masson.
- Chokron S, Brickman AM, Wei T, Buchsbaum MS. Hemispheric asymmetry for selective attention. *Brain Res Cogn Brain Res* 2000;9:85-90.
- Chokron S, Kazandjian S, De Agostini M (2009) Effects of reading direction on visuospatial organization: a critical review.In: Gari A, Mylonas K (eds) Quod erat

- demonstrandum: from Herodotus' ethnographic journeys to cross-cultural research. Pedio Books Publishing, Athens, pp 107–114
- Chokron S, Perez C, Obadia M, Gaudry I, Laloum L, Gout O. (2008) From blindsight to sight: cognitive rehabilitation of visual field defects. *Restor Neurol Neurosci* ;26:305-320.
- Chokron S. (2006) Contributions of functional neuroimaging to clinical and cognitive neuropsychology: a selective review. *Current Medical Imaging Reviews*;2:59-69.
- Chokron, S. (1996). Sémiologie, évaluation et principe de rééducation des troubles neurovisuels d'origine centrale. *Glossa*, 51, 4-16.
- Chokron, S. (1998). *Prise en charge neuropsychologique des troubles neurovisuels d'origine centrale*. In Belin, C., Boucart, M., Hénaff, M. A. (Eds.). *La vision: aspects perceptifs et cognitifs*, Solal, Marseille.
- Chokron, S., Brickman, A., Wei, T. & Buchsbaum, M.S. (2000). Hemispheric asymmetry for selective attention. *Brain Research : Cognitive*, 9: 85-90.
- Chokron S (2006). La cécité corticale: aspects neurophysiologiques, neuro-ophtalmologiques et neuropsychologiques. *Encyclopedie Médico-Chirurgicale*, Ophtalmologie, 21-545-A-10
- Christie, J., Ginsberg, J. P., Steedman, J., Fridriksson, J., Bonilha, L., & Rorden, C. (2012). Global versus local processing: seeing the left side of the forest and the right side of the trees. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 28.
- Cohen, L. G., Weeks, R. A., Sadato, N., Celnik, P., Ishii, K., & Hallett, M. (1999). Period of susceptibility for cross-modal plasticity in the blind. *Annals of neurology*, 45(4), 451–60.
- Corballis MC, Sidey S (1993) Effects of concurrent memory load on visual-field differences in mental rotation. *Neuropsychologia*;31:183-97.
- Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Petersen SE. (1990) Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans. *Science*;248:1556-1559.
- Corbetta M, Shulman GL. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat Rev Neurosci.*;3(3):201-15.
- Coubard OA, Kapoula Z (2008) Saccades during symmetrical vergence. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 246:521–536
- Cowey A (2010). Visual system: how does blindsight arise? *Curr Biol*. 14;20(17):R702-4.
- Cowey, A. & Stoerig, P. (2001). Detection and discrimination of chromatic targets in hemianopic macaque monkeys and humans. *European journal of neuroscience*, 14: 1320-1330.
- Cowey, A., & Stoerig, P. (1991). The neurobiology of blindsight. *Trends in neurosciences*, 14(4), 140–5.
- Cowey, A., & Stoerig, P. (1995). Blindsight in monkeys. *Nature*, 373(6511), 247–9.

- Cowey, A., & Stoerig, P. (1997). Visual detection in monkeys with blindsight. *Neuropsychologia*, 35(7), 929–39.
- Cowey, A., Alexander, I., & Stoerig, P. (2008). A blindsight conundrum: how to respond when there is no correct response. *Neuropsychologia*, 46(3), 870–8.
- Danckert J., Revol, P., Pisella, L., Krolak-Salmon, P., Vighetto, A., Goodale, M.A., Rossetti, Y., (2003). Measuring uncconscious action in action-blindsight : exploring the kinematics of pointing movements to targets in the blind field of two patients with cortical hemianopia. *Neuropsychologia*, 41 : 1068-1081.
- Danckert, J. & Rossetti, Y. (2005). Blindsight in action: what can the different sub-types of blindsight tell us about the control of visually guided actions ? *Neuroscience and behavioral reviews*, 29: 1035-1046.
- Danckert, J., & Goodale, M. A. (2000). A conscious route to unconscious vision. *Current biology: CB*, 10(2), R64–7.
- de Gelder, B., Vroomen, J., Pourtois, G., & Weiskrantz, L. (1999). Non-conscious recognition of affect in the absence of striate cortex. *Neuroreport*, 10(18), 3759–63. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10716205>
- De Weerd, P., Gattass, R., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1995). Responses of cells in monkey visual cortex during perceptual filling-in of an artificial scotoma. *Nature*, 377(6551), 731–4.
- Dehaene, S., & Naccache, L. (2001). Towards a cognitive neuroscience of consciousness: basic evidence and a workspace framework. *Cognition*, 79(1-2), 1–37.
- Dehaene S., Cohen L., LeBihan D., Mangin J.F., Poline J.B., et Rivière D.(2001) Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *{Nature Neuroscience}*, 4:752—758.
- Delaj L, D'Alessandro R, Stracciari A, Fonti C, Cretella L, Lodi R (2010) Long-lasting hemianopia due to PCA. *J Neurol.*;257(9):1562-4.
- Delis D., Robertson L.C., Efron R. (1986). Hemispheric specialization of memory for visual hierarchical stimuli. *Neuropsychologia*.;24(2):205-14.
- Deschamps R., Lyon-Caen O. & Tourbah, A. (2002). Neuropathies optiques inflammatoires et sclérose en plaques. *Revue neurologique*, 158, 6-7, 673-681.
- Desimone R, Moran J, Schein SJ, Mishkin M. (1993) A role for the corpus callosum in visual area V4 of the macaque. *Vis Neurosci.*;10(1):159-71.
- Dienes, Z., & Perner, J. (1999). A theory of implicit and explicit knowledge. *The Behavioral and brain sciences*, 22(5), 735–55; discussion 755–808.
- Dilks, D. D., Julian, J. B., Kubiľius, J., Spelke, E. S., & Kanwisher, N. (2011). Mirror-image sensitivity and invariance in object and scene processing pathways. *The Journal of Neuroscience*, 31(31), 11305-11312.

- Dellatolas, G., De Agostini, M. & al. (1988) Mesure de la préférence manuelle dans la population française adulte. *Revue française de psychologie appliquée*, 38(2) : 117-136
- Diller, R., & Thompson, K. (2007). Visual loss secondary to acquired immunodeficiency virus-related progressive multifocal leukoencephalopathy demonstrating clinical improvement with highly active antiretroviral therapy. *Optometry (St. Louis, Mo.)*, 78(2), 63–70.
- Dolcos F., Rice H.J., Cabeza R. (2002). Hemispheric asymmetry and aging : right hemisphere decline or asymmetry reduction. *Neurosciences Biobehavior Revue*, 26(7), 819-825.
- Drewes, J., Trommershäuser, J., & Gegenfurtner, K. R. (2011). Parallel visual search and rapid animal detection in natural scenes. *Journal of vision*, 11(2).
- Dubois-Poulsen A. 1952 [Variations of the sensitivity and nervous interactions of the visual field]. *Ann Ocul (Paris)*. Dec;185(12):1025-52.
- Ducarne, B., Bergego, C., & Barbeau, M. (1981). [Restitution of visual function in two cases of post-anoxic occipital blindness: a long term clinical study (author's transl)]. *Revue neurologique*, 137(12), 741–84.
- Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1998). Ventral intraparietal area of the macaque: congruent visual and somatic response properties. *Journal of neurophysiology*, 79(1), 126–36.
- Dunn, J. C. (2004). Remember-know: a matter of confidence. *Psychological review*, 111(2), 524–42.
- Elbert, T., Candia, V., Altenmüller, E., Rau, H., Sterr, A., Rockstroh, B., Pantev, C., et al. (1998). Alteration of digital representations in somatosensory cortex in focal hand dystonia. *Neuroreport*, 9(16), 3571–5.
- Eysel, U. T. (1997). Perilesional cortical dysfunction and reorganization. *Advances in neurology*, 73, 195–206.
- Eysel, U. T., & Schmidt-Kastner, R. (1991). Neuronal dysfunction at the border of focal lesions in cat visual cortex. *Neuroscience letters*, 131(1), 45–8.
- Fabre-Thorpe, M., Delorme, A., Marlot, C. & Thorpe, S. (2001). A limit to the speed of processing in ultra-rapid visual categorization of novel natural scenes. *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 13(2): 1-10.
- Fabre-Thorpe, M., Richard, G., & Thorpe, S. J. (1998). Rapid categorization of natural images by rhesus monkeys. *Neuroreport*, 9(2), 303–8.
- Fendrich R., Gazzaniga M.S. (1989) Evidence of foveal splitting in a commissurotomy patient. *Neuropsychologia* 27:273-281.
- Fendrich, R., Wessinger, C.M. & Gazzaniga, M.S. (1992) Residual vision in a scotoma: implications for blindsight. *Science*, 258: 1489.

- Fendrich, R., Wessinger, C.M. & Gazzaniga, M.S. (2001). Speculations on the neural basis of islands of blindsight. *Progress in Brain Research*, 134: 353-366.
- ffytche, D. H., Guy, C. N., & Zeki, S. (1996). Motion specific responses from a blind hemifield. *Brain: a journal of neurology*, 119 (Pt 6, 1971–82.
- Fine I, Jacobs RA. (2002) Comparing perceptual learning tasks: a review. *J Vis.*;2(2):190-203.
- Fink GR, Marshall JC, Weiss PH, Toni I, Zilles K. (2002) Task instructions influence the cognitive strategies involved in line bisection judgements: evidence from modulated neural mechanisms revealed by fMRI. *Neuropsychologia*;40:119-130.
- Fink, G.R., Halligan, P.W., Marshall, J.C., Frith C.D., Frackowiak, R.S. & Dolan, R.J. (1996). Where in the brain does visual attention select the forest and the trees ? *Nature*, 382: 626-628.
- Fink, G.R., Marshall, J.C., Halligan P.W. & Dolan, R.J. (1999). Hemispheric asymmetries in global/local processing are modulate by perceptual salience. *Neuropsychologia*, 37: 31-40.
- Fischer B, Gezeck S, Hartnegg K (1997) The analysis of saccadic eye movements from gap and overlap paradigms. *Brain Res Brain Res Protoc* 2:47-52.
- Fischer B, Ramsperger E (1984) Human express saccades: extremely short reaction times of goal directed eye movements. *Exp Brain Res* 57:191-195
- Fize D, Fabre-Thorpe M, Richard G, Doyon B, Thorpe SJ (2005) Rapid categorization of foveal and extrafoveal natural images: associated ERPs and effects of lateralization. *Brain Cogn*;59:145-58.
- Flor, H., & Diers, M. (2009). Sensorimotor training and cortical reorganization. *NeuroRehabilitation*, 25(1), 19–27.
- Friston, K.J., Holmes, A.P., Worsley, K.J., Poline, J.P., Frith, C.D., Frackowiack, R.S. (1995) Statistical parametric maps in functionalimaging: a general linear approach. *Hum Brain Mapp*;2,189– 210.
- Furmanski, C. S., Schluppeck, D., & Engel, S. A. (2004). Learning strengthens the response of primary visual cortex to simple patterns. *Current biology: CB*, 14(7), 573–8.
- Galletti, C., Fattori, P., Gamberini, M., & Kutz, D. F. (1999). The cortical visual area V6: brain location and visual topography. *The European journal of neuroscience*, 11(11), 3922–36.
- Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B. & Mangun, G.R. (2001) Latéralisation et spécialisation cérébrales. In Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B. & Mangun, G.R. (Eds.), *Neurosciences cognitives. La Biologie de l'esprit* (pp. 323 - 370). Paris : De Boeck Université
- Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B. & Mangun, G.R. (2001) Perception et encodage. In Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B. & Mangun, G.R. (Eds.), *Neurosciences cognitives. La Biologie de l'esprit* (pp. 121 – 162). Paris : De Boeck Université

- Gharai, S., Venkatesh, P., Sinha, A., Garg, S., & Ghosh, P. (2012). Isolated homonymous hemianopsia due to presumptive cerebral tubercular abscess as the initial manifestation of human immunodeficiency virus infection. *Indian journal of ophthalmology*, 60(4), 321–4.
- Ginsburg, A. P. (1986). Spatial filtering and visual form perception. In K. Boff, L. Kauman & J. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance* (Vol. II, chap.34, pp. 1-41). NY: Wiley.
- Girard, P., Salin, P. A., & Bullier, J. (1992). Response activity of neurons in area MT of the macaque monkey during reversible inactivation of area V1. *Journal of Neurophysiology*, 67(6), 1437-1446.
- Glisson, C. C., & Galetta, S. L. (2007). Visual rehabilitation: now you see it; now you don't. *Neurology*, 68(22), 1881–2.
- Goebel, R., Khorrām-Sefat, D., Muckli, L., Hacker, H., & Singer, W. (1998). The constructive nature of vision: direct evidence from functional magnetic resonance imaging studies of apparent motion and motion imagery. *The European journal of neuroscience*, 10(5), 1563–73.
- Goebel, R., Muckli, L., Zanella, F. E., Singer, W., & Stoerig, P. (2001). Sustained extrastriate cortical activation without visual awareness revealed by fMRI studies of hemianopic patients. *Vision Research*, 41, 1459-1474.
- Goldstein, G., & Shelly, C. (1981). Does the right hemisphere age more rapidly than the left? *Journal of clinical neuropsychology*, 3(1), 65–78.
- Goodwin, D. (2011). Transient complete homonymous hemianopia associated with migraine. *Optometry (St. Louis, Mo.)*, 82(5), 298–305.
- Gowen E, Abadi RV (2005) Saccadic instabilities and voluntary saccadic behaviour. *Exp Brain Res* 164:29–40
- Grabowska, A. & Nowicka, A. (1996). Visual-spatial-frequency model of cerebral asymmetry: critical survey of behavioral and electrophysiological studies. *Psychological Bulletin*, 120(3), 434-449.
- Grabowska, A., Semenza, C., Denes, G. & Testa, S. (1989). Impaired grating discrimination following right hemisphere damage. *Neuropsychologia*, 21(2), 259-263.
- Grabowska, A., Szymanska, O., Nowicka, A., & Kwieciein, M. (1992). The effect of unilateral brain lesions on perception of visual illusions. *Behavioural brain research*, 47(2), 191–7.
- Greenwald R.R., Jerger J. (2001). Aging affects hemispheric asymmetry on a competing speech task. *J.Am.Acad. Audiol.*, 12 (4), 167-173.
- Greenwood PM, Parasuraman R. (1999) Scale of attentional focus in visual search. *Percept Psychophys.* ;61(5):837-59
- Grill-Spector K, and Kanwisher N (2005) Visual recognition: as soon as you know it is there, you know what it is. *Psychological Science*, 16(2): 152-160.

- Grill-Spector, K., & Malach, R. (2004). The human visual cortex. *Annual review of neuroscience*, 27, 649–77.
- Guyader, N., Chauvin, A., Peyrin, C., Hérault, J., Marendaz, C. (2004). Image phase or amplitude? Rapid scene categorization is an amplitude-based process. *Comptes Rendus Biologies*, 327, pp. 313-318.
- Guyonneau R, Kirchner H, Thorpe SJ (2006) Animals roll around the clock: the rotation invariance of ultrarapid visual processing. *J Vis.* ;6(10):1008-17.
- Hamilton, R. H., & Pascual-Leone, A. (1998). Cortical plasticity associated with Braille learning. *Trends in cognitive sciences*, 2(5), 168–74.
- Han, S., Weaver, J. A., Murray, S. O., Kang, X., Yund, E. W., & Woods, D. L. (2002). Hemispheric asymmetry in global/local processing: Effects of stimulus position and spatial frequency. *Neuroimage*, 17, 1290-1299.
- Hartley A.A (1993). Evidence for the selective preservation of spatial selective attention in old age. *Psychology and aging*, 8, 371-379.
- Hausmann M, Gunturkun O (1999) Sex differences in functional cerebral asymmetries in a repeated measures design. *Brain Cogn*;41:263-75.
- Hausmann M.(2005). Hemispheric asymmetry in spatial attention across the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, 42.
- Haxby, J. V., Grady, C. L., Horwitz, B., Ungerleider, L. G., Mishkin, M., Carson, R. E., Herscovitch, P., et al. (1991). Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(5), 1621–5.
- Hecaen, H. (1972) Introduction à la neuropsychologie (pp. 284-288). Paris : Larousse Université. 327 pages.
- Heilman KM, Van Den Abell T. (1980) Right hemisphere dominance for attention: the mechanism underlying hemispheric asymmetries of inattention (neglect). *Neurology* ;30:327-330.
- Heilman, K.M., Watson, R.T. & Valenstein, E. (1993). Neglect and related disorders. In: Heilman K.M. & Valenstein, E. (Eds.). *Clinical neuropsychology*. New York: Oxford University Press, pp. 279-336.
- Henriksson, L., Raninen, A., Näsänen, R., Hyvärinen, L., & Vanni, S. (2007). Training-induced cortical representation of a hemianopic hemifield. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 78(1), 74–81.
- Hensch, T. K. (2004). Critical period regulation. *Annual review of neuroscience*, 27, 549–79.
- Hensch, T. K., & Fagiolini, M. (2005). Excitatory-inhibitory balance and critical period plasticity in developing visual cortex. *Progress in brain research*, 147, 115–24.

- Hérault, J., Oliva, A., & Guérin-Dugué, A. (1997). *Scene categorisation by curvilinear component analysis of low frequency spectra*. Proceedings of the 5th European Symposium on Artificial Neural Network (p. 91-96). Bruxelles: D facto publications.
- Hillis, A. E., Newhart, M., Heidler, J., Barker, P. B., Herskovits, E. H., & Degaonkar, M. (2005). Anatomy of spatial attention: insights from perfusion imaging and hemispatial neglect in acute stroke. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 25(12), 3161–7.
- Honda H (2002) Idiosyncratic left-right asymmetries of saccadic latencies: examination in a gap paradigm. *Vis Res* 42:1437–1445
- Horton, J. C. (2005). Vision restoration therapy: confounded by eye movements. *The British journal of ophthalmology*, 89(7), 792–4.
- Houdé O, Mazoyer B, Tzourio-Mazoyer N (2002) Cerveau et psychologie : Presses universitaires de France.
- Hubel DH, Wiesel TN. (1968) Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *J Physiol.*;195(1):215-43.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *The Journal of physiology*, 206(2), 419–36.
- Huber, A. (1991). [Homonymous hemianopsia]. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, 199(6), 396–405.
- Hugues H, Nozawa G, Kitterle F. (1996). Global precedence, spatial frequency channels, and the statistics of the natural image. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 197-230.
- Hummel, F., & Cohen, L. G. (2005). Improvement of motor function with noninvasive cortical stimulation in a patient with chronic stroke. *Neurorehabilitation and neural repair*, 19(1), 14–9.
- Humphrey, N.K. & Weiskrantz, L. (1967). Vision in monkeys after removal of the striate cortex. *Nature*, 215, 595-
- Humphreys, G. W. (1998). Neural representation of objects in space: a dual coding account. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 353(1373), 1341–51.
- Huxlin, K. R. (2008). Perceptual plasticity in damaged adult visual systems. *Vision research*, 48(20), 2154–66.
- Huxlin, K. R., & Pasternak, T. (2004). Training-induced recovery of visual motion perception after extrastriate cortical damage in the adult cat. *Cerebral cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 14(1), 81–90.
- Ivanco, T. L., & Greenough, W. T. (2000). Physiological consequences of morphologically detectable synaptic plasticity: potential uses for examining recovery following damage. *Neuropharmacology*, 39(5), 765–76.
- James W. (1890). *The principles of Psychology*. Henry Holt.

- Jenkins, T. M., Toosy, A. T., Ciccarelli, O., Miszkiel, K. A., Wheeler-Kingshott, A. C., Henderson, ... Thompson, A. J. (2010). Neuroplasticity predicts outcome of optic neuritis independent of tissue damage. *Annals of Neurology*, 67, 99-113.
- Jenkins, W. M., Merzenich, M. M., Ochs, M. T., Allard, T., & Guic-Robles, E. (1990). Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation. *Journal of neurophysiology*, 63(1), 82-104.
- Johansen-Berg, H., Rushworth, M. F. S., Bogdanovic, M. D., Kischka, U., Wimalaratna, S., & Matthews, P. M. (2002). The role of ipsilateral premotor cortex in hand movement after stroke. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(22), 14518-23.
- Kanwisher, N. (2001). Faces and places: of central (and peripheral) interest. *Nature neuroscience*, 4(5), 455-6.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: A module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience*, 17, 4302-4311.
- Karni, A., & Sagi, D. (1993). The time course of learning a visual skill. *Nature*, 365(6443), 250-2.
- Kasten E, Sabel BA.(2007) Visual hallucinations during spontaneous and training-induced visual field recovery. *Neuropsychologia*.;18;45(11):2598-607.
- Kasten, E., Bunzenthall, U., & Sabel, B. A. (2006). Visual field recovery after vision restoration therapy (VRT) is independent of eye movements: an eye tracker study. *Behavioural brain research*, 175(1), 18-26.
- Kasten, E., Müller-Oehring, E., & Sabel, B. A. (2001). Stability of visual field enlargements following computer-based restitution training -- results of a follow-up. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 23(3), 297-305.
- Kasten, E., Poggel, D. A., & Sabel, B. A. (2000). Computer-based training of stimulus detection improves color and simple pattern recognition in the defective field of hemianopic subjects. *Journal of cognitive neuroscience*, 12(6), 1001-12.
- Kazandjian S, Chokron S (2008) Paying attention to reading direction. *Nat Rev Neurosci* 9:965
- Keller I, Lefin-Rank G.(2010) Improvement of visual search after audiovisual exploration training in hemianopic patients.*Neurorehabil Neural Repair*.;24(7):666-73.
- Kerkhoff, G. (2000). Neurovisual rehabilitation : recent developments and future directions. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 68, 691-706.
- Kerkhoff, G., Schaub, J., & Zihl, J. (1990). [Anamnesis of brain-originated vision disorders]. *Der Nervenarzt*, 61(12), 711-8.

- Kerkoff, G. (1999). Restorative and compensatory therapy approaches in cerebral blindness - a review. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 15: 255-271.
- Kessler, J., Thiel, A., Karbe, H., & Heiss, W. D. (2000). Piracetam improves activated blood flow and facilitates rehabilitation of poststroke aphasic patients. *Stroke; a journal of cerebral circulation*, 31(9), 2112-6.
- Kinsbourne M (1993) Orientational bias model of unilateral neglect: evidence from attentional gradients within hemispace. In: Robertson IH, Marshall JC (eds) *Unilateral neglect: clinical and experimental studies*. Lawrence Erlbaum Associates, Hove, pp 63-86
- Kinsbourne, M. (1970). The cerebral basis of lateral asymmetries in attention. *Acta psychologica*, 33, 193-201.
- Kitterle FL, Christman S, Hellige JB. (1990) Hemispheric differences are found in the identification, but not the detection, of low versus high spatial frequencies. *Percept Psychophys.*;48:297-306.
- Kitterle FL, Hellige JB, Christman S (1992) Visual hemispheric asymmetries depend on which spatial frequencies are task relevant. *Brain Cogn*;20:308-14.
- Kitterle, FL, Christman, S, & Hellige JB (1990). Hemispheric differences are found in the identification, but not the detection, of low versus high spatial frequencies. *Perception and Psychophysics*, 48(4), 297-306.
- Kleinman, J. T., Newhart, M., Davis, C., Heidler-Gary, J., Gottesman, R. F., & Hillis, A. E. (2007). Right hemispatial neglect: frequency and characterization following acute left hemisphere stroke. *Brain and cognition*, 64(1), 50-9.
- Kolb, B. & Wishaw, I.Q. (2002) Comment voyons-nous le monde ? In Kolb, B. & Wishaw, I.Q. (Eds.), *Cerveau et comportement* (pp. 276 – 317). Paris : De Boeck
- Kolb, M., Petersen, D., Schiefer, U., Kolb, R., & Skalej, M. (1995). Scotoma perception in white-noise-field campimetry and postchiasmal visual pathway lesions. *German journal of ophthalmology*, 4(4), 228-33.
- Korsholm K., Madsen K.H., Frederiksen J.L., Skimminge A. & Lund T.E. (2007). Recovery from optic neuritis :an ROI-based analysis of LGN and visual cortical areas. *Brain*, 130, 1244-1253.
- Kramer, J.H., Ellenberg, L., Leonard, J., Share, L.J. Developmental sex differences in global-local perceptual bias, *Neuropsychology*, 10: 402-407, 1996.
- LaBerge D, Buchsbaum MS. (1990) Positron emission tomographic measurements of pulvinar activity during an attention task. *J Neurosci.*;10(2):613-9.
- LaBerge D. (1998). L'attention comme intensification de l'activité corticale. *Revue de Neuropsychologie*, 8, 53-81.
- LaBerge D.(1995). *Attentional processing : The brain's art of mindfulness*. Cambridge, MA, Harvard University Press.

- Lamb, M. R., Robertson, L. C., & Knight, R. T. (1990). Component mechanisms underlying the processing of hierarchically organized patterns: inferences from patients with unilateral cortical lesions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 16(3), 471-483.
- Lamb, M.R., Robertson, L. & Knight, R.T. (1989). Attention and interference in the processing of global and local information: effects of unilateral temporal-parietal junction lesions, *Neuropsychologia*, 27: 471-483.
- Lavin, P. J. M. (2005). Hyperglycemic hemianopia: a reversible complication of non-ketotic hyperglycemia. *Neurology*, 65(4), 616–9.
- Lee J, Chung D, Chang S, Kim S, Kim SW, Park H, Ryu S, Jeong J.(2012) Gender differences revealed in the right posterior temporal areas during Navon letter identification tasks. *Brain Imaging Behav*.
- Leff AP, Spitsyna G, Plant GT, Wise RJ. (2006) Structural anatomy of pure and hemianopic alexia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*;77:1004-1007.
- Leh, S.E., Johansen-Berg, H. & Ptito, A. (2006). Unconscious vision : new insights into the neuronal correlate of blindsight using diffusion tractography. *Brain*, 129: 1822-1832.
- Lessard, N., Paré, M., Lepore, F., & Lassonde, M. (1998). Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, 395(6699), 278–80.
- Levin, N., Orlov, T., Dotan, S., & Zohary, E. (2006). Normal and abnormal fMRI activation patterns in the visual cortex after recovery from optic neuritis. *NeuroImage*, 33(4), 1161–8.
- Levy, L. M., & Hallett, M. (2002). Impaired brain GABA in focal dystonia. *Annals of neurology*, 51(1), 93–101.
- Liepert, J., Bauder, H., Wolfgang, H. R., Miltner, W. H., Taub, E., & Weiller, C. (2000). Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans. *Stroke; a journal of cerebral circulation*, 31(6), 1210–6.
- Lindell AK. In your right mind: right hemisphere contributions to language processing and production. *Neuropsychol Rev* 2006;16:131-148.
- Liu, Bryan R., Miki A., Woo J., Liu G., Elliott M. (2006) "Magnocellular and Parvocellular Visual Pathways Have Different Blood Oxygen Level–Dependent Signal Time Courses in Human Primary Visual Cortex". *Am J Neuroradiol* 27:1628 –34.
- Lux, S., Marshall, J.C., Ritzl, A., Weiss, P.H., Pietrzyk, U., Shah, N.J., Zilles, K. & Fink, G.R. (2004). A functional magnetic resonance imaging study of local/global processing with stimulus presentation in the peripheral visual hemifields. *Neuroscience*, 124: 113-120.
- Machner, B., Sprenger, A., Sander, T., Heide, W., Kimmig, H., Helmchen, C., & Kömpf, D. (2009). Visual search disorders in acute and chronic homonymous hemianopia: lesion effects and adaptive strategies. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164, 419–26.

- Mack ML, Gauthier I, Sadr J, and Palmeri TJ (2008) Object detection and basic-level categorization: sometimes you know it is there before you know what it is. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15 : 28-35.
- Maertens, M., & Pollmann, S. (2005). fMRI reveals a common neural substrate of illusory and real contours in V1 after perceptual learning. *Journal of cognitive neuroscience*, 17(10), 1553–64.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(8), 4398–403.
- Mann SL, Hazlett EA, Byne W, Hof PR, Buchsbaum MS, Cohen BH, Goldstein KE, Haznedar MM, Mitsis EM, Siever LJ, Chu KW (2011) Anterior and posterior cingulate cortex volume in healthy adults: effects of aging and gender differences. *Brain Res.* 15;1401:18-29.
- Marendaz, C., Rousset, S., & Charnallet, A. (2003). Reconnaissance des scènes, des objets et des visages. In A. Delorme & M. Fluckiger (Eds.), *Perception et Réalité*. Montréal: Gaëtan Morin Editeur.
- Marshall RS, Ferrera JJ, Barnes A, Xian Z, O'Brien KA, Chmayssani M, Hirsch J, Lazar RM. (2008) Brain activity associated with stimulation therapy of the visual borderzone in hemianopic stroke patients. *Neurorehabil Neural Repair* ;22:136-144.
- Marshall, R. S., Perera, G. M., Lazar, R. M., Krakauer, J. W., Constantine, R. C., & DeLaPaz, R. L. (2000). Evolution of cortical activation during recovery from corticospinal tract infarction. *Stroke; a journal of cerebral circulation*, 31(3), 656–61.
- Martin PR, Grunert U (2003) Ganglion cells in mammalian retinae. In: Chalupa LM, Werner JS, editors. *The visual neurosciences*. Cambridge: The MIT Press:410-421.
- Martinez, A., Moses, P., Frank, L., Buxton, R., Wong, E., & Stiles, J. (1997). Hemispheric asymmetries in global and local processing: evidence from fMRI. *Neuroreport*, 8(7), 1685-1689.
- Marzi, C. A., Mancini, F., Metitieri, T., & Savazzi, S. (2009). Blindsight following visual cortex deafferentation disappears with purple and red stimuli: a case study. *Neuropsychologia*, 47(5), 1382–5.
- Maunsell, J. H., & van Essen, D. C. (1983a). The connections of the middle temporal visual area (MT) and their relationship to a cortical hierarchy in the macaque monkey. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 3(12), 2563–86.
- Maunsell, J. H., & Van Essen, D. C. (1983b). Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. II. Binocular interactions and sensitivity to binocular disparity. *Journal of neurophysiology*, 49(5), 1148–67.
- Mazoyer, B. (2002). L'imagerie par raisonnement magnétique. In : Cerveau et Psychologie. Paris : Presses Universitaires de France.

- McCaa CS. (1982). The eye and visual nervous system: anatomy, physiology and toxicology. *Environ Health Perspect.*;44:1-8.
- McCarthy, R. A., James-Galton, M., & Plant, G. T. (2006). Form completion across a hemianopic boundary: behindsight? *Neuropsychologia*, 44(8), 1269–81.
- McDonald, S. A., Spitsyna, G., Shillcock, R. C., Wise, R. J. S., & Leff, A. P. (2006). Patients with hemianopic alexia adopt an inefficient eye movement strategy when reading text. *Brain: a journal of neurology*, 129(Pt 1), 158–67.
- McFadzean, R., Brosnahan, D., Hadley, D., & Mutlukan, E. (1994). Representation of the visual field in the occipital striate cortex. *The British journal of ophthalmology*, 78(3), 185–90.
- McGee, A. W., Yang, Y., Fischer, Q. S., Daw, N. W., & Strittmatter, S. M. (2005). Experience-driven plasticity of visual cortex limited by myelin and Nogo receptor. *Science (New York, N.Y.)*, 309(5744), 2222–6.
- Mehta Z, Newcombe F, Damasio H. A left hemisphere contribution to visuospatial processing. *Cortex* 1987;23:447-461
- Meienberg, O., Zangemeister, W. H., Rosenberg, M., Hoyt, W. F., & Stark, L. (1981). Saccadic eye movement strategies in patients with homonymous hemianopia. *Annals of neurology*, 9(6), 537–44.
- Merabet, L. B., & Pascual-Leone, A. (2010). Neural reorganization following sensory loss: the opportunity of change. *Nature reviews. Neuroscience*, 11(1), 44–52.
- Merigan WH, Maunsell JH. How parallel are the primate visual pathways? *Annu Rev Neurosci.* 1993;16:369-402.
- Merigan, W. H., & Maunsell, J. H. (1993). How parallel are the primate visual pathways? *Annual review of neuroscience*, 16, 369–402.
- Mermillod M, Guyader N, Chauvin A. (2005) The *coarse-to-fine* hypothesis revisited: evidence from neuro-computational modeling. *Brain and Cognition.*;57(2):151-7.
- Mermillod, M., Guyader, N. & Chauvin, A. (2005). The *coarse-to-fine* hypothesis revisited: Evidence from neuro-computational modelling. *Brain and Cognition*, 57, 151-157.
- Merzenich, M. M., Kaas, J. H., Wall, J., Nelson, R. J., Sur, M., & Felleman, D. (1983). Topographic reorganization of somatosensory cortical areas 3b and 1 in adult monkeys following restricted deafferentation. *Neuroscience*, 8(1), 33–55.
- Mesulam M.M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Annals of Neurology*, 28, 597-613.
- Mijović-Prelec, D., Shin, L.M., Chabris, C.F. & Kosslyn, S.M. (1994). When does "no" really mean "yes"? A case study in unilateral visual neglect. *Neuropsychologia*, 32: 151-158.
- Miki A., Liu G.T., Raz J., Van Erp T.G., Liu C.J., Leuthardt E.C. & Haselgrove J.C. (2000). Contralateral monocular dominance in anterior visual cortex confirmed by

- functional magnetic resonance imaging. *American Journal Ophtalmology*, 130, 6, 821-824.
- Milner, A.D. (1995). Cerebral correlates of visual awareness. *Neuropsychologia*, 33 (9): 1117-1130.
- Milner, B. (2005). The medial temporal-lobe amnesic syndrome. *The Psychiatric clinics of North America*, 28(3), 599–611, 609.
- Mishkin M., Ungerleider L.G. (1982). Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-preoccipital cortex in monkeys. *Behav Brain Res.*;6(1):57-77.
- Mohler, C.W. & Wurtz, R. H. (1977) Role of striate cortex and superior colliculus in visual guidance of saccadic eye movements in monkeys, *Journal of Neurophysiology*, 40: 74-94
- Moran, J., & Desimone, R. (1985). Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex. *Science (New York, N.Y.)*, 229(4715), 782–4.
- Morland, A. B., Jones, S. R., Finlay, A. L., Deyzac, E., Lê, S., & Kemp, S. (1999). Visual perception of motion, luminance and colour in a human hemianope. *Brain: a journal of neurology*, 122 (Pt 6, 1183–98.
- Morland, A. B., Lê, S., Carroll, E., Hoffmann, M. B., & Pambakian, A. (2004). The role of spared calcarine cortex and lateral occipital cortex in the responses of human hemianopes to visual motion. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(2), 204–18.
- Morris, J. S., DeGelder, B., Weiskrantz, L., & Dolan, R. J. (2001). Differential extrageniculostriate and amygdala responses to presentation of emotional faces in a cortically blind field. *Brain*, 124: 1241-1252.
- Mosso, A.(1881). Ueber den Kreislauf des Blutes im menschlichen Gehirn. Leipzig:Verlag vonVeit. Nichols,M.J. & Newsome, W.T. (1999). The neurobiology of cognition. *Nature* 402,C35-C38.
- Mueller, I., Mast, H., & Sabel, B. A. (2007). Recovery of visual field defects: a large clinical observational study using vision restoration therapy. *Restorative neurology and neuroscience*, 25(5-6), 563–72.
- Münste, T. F., Schuppert, M., Johannes, S., Wieringa, B. M., Kohlmetz, C., & Altenmüller, E. (1998). Brain potentials in patients with music perception deficits: evidence for an early locus. *Neuroscience letters*, 256(2), 85–8.
- Musel B, Hera R, Chokron S, Alleysson D, Chiquet C, Romanet JP, Guyader N, Peyrin C (2011) Residual abilities in age-related macular degeneration to process spatial frequencies during natural scene categorization. *Vis Neurosci.*;28(6):529-41.
- Musel, B., Chauvin, A., Guyader, N., Chokron, S., & Peyrin, C. (2012). Is coarse-to-fine strategy sensitive to normal aging? *PloS one*, 7(6), e38493.
- Naccache L, *Le Nouvel Inconscient. Freud, Christophe Colomb des neurosciences*. Paris, Odile Jacob, 2006

- Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cerebral cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 11(10), 966–74.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: the precedence of global features in visual processing. *Cognitive Psychology*, 9: 353-383.
- Nebes R.D.&Brady C.B.(1993).Phasic and tonic alertness in Alzheimer's disease. *Cortex*,29,77-90.
- Nelles G, de Greiff A, Pscherer A, Forsting M, Gerhard H, Esser J, Diener HC. (2007). Cortical activation in hemianopia after stroke. *Neurosci Lett* ; 9;426(1):34-8.
- Nelles G, Pscherer A, de Greiff A, Forsting M, Gerhard H, Esser J, Diener HC. (2009) Eye-movement training-induced plasticity in patients with post-stroke hemianopia. *J Neurol* ;256:726-733.
- Nelles G, Widman G, de Greiff A, Meistrowitz A, Dimitrova A, Weber J, Forsting M, Esser J, Diener HC.(2002) Brain representation of hemifield stimulation in poststroke visual field defects. *Stroke* 2002;33:1286-1293.
- Nelles, G., Esser, J., Eckstein, A., Tiede, A., Gerhard, H., & Diener, H. C. (2001). Compensatory visual field training for patients with hemianopia after stroke. *Neuroscience letters*, 306(3), 189–92.
- Ogawa, S., Lee, T.M. Kay, A.R., & Tank, D.W. (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependant on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 87, 9868-9872.
- Oldfield RC (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9:97–113
- Oliva, A., & Schyns, P.G. (1997). Coarse blobs or fine edges? Evidence that information diagnosticity changes the perception of complex visual stimuli. *Cognitive Psychology*, 34, 72-107.
- Overgaard M, Fehl K, Mouridsen K, Bergholt B, Cleeremans A. Seeing without Seeing? Degraded Conscious Vision in a Blindsight Patient. *PLoS One*. 2008;3(8):e3028.
- Palmer, S. (1993). Modern theories of gestalt perception. In: Humphreys, G.W. (Ed.), *Understanding Vision*. Blackwell, Oxford, 39-70.
- Pambakian, A. L. M., Curie, J., Kennard, C. (2005). Rehabilitation strategies for patients with homonymous visual field defects. *Journal of Neuro-Ophthalmology*, 25, 136-142.
- Pambakian, A. L. M., Mannan, S. K., Hodgson, T. L., & Kennard, C. (2004). Saccadic visual search training: a treatment for patients with homonymous hemianopia. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 75(10), 1443–8.
- Pambakian, A.L.M. & Kennard, C. (1997). Can visual function can be restored in patients with homonymous hemianopia ? *British Journal of Ophtalmology*, 81: 324-328.

- Papageorgiou, E., Hardiess, G., Schaeffel, F., Wiethoelter, H., Karnath, H.-O., Mallot, H., Schoenfish, B., et al. (2007). Assessment of vision-related quality of life in patients with homonymous visual field defects. *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology = Albrecht von Graefes Archiv für klinische und experimentelle Ophthalmologie*, 245(12), 1749–58.
- Paramei GV, Sabel BA. (2008) Contour-integration deficits on the intact side of the visual field in hemianopia patients. *Behav Brain Res*;188:109-124.
- Pariente, J., Loubinoux, I., Carel, C., Albucher, J. F., Leger, A., Manelfe, C., Rascol, O., et al. (2001). Fluoxetine modulates motor performance and cerebral activation of patients recovering from stroke. *Annals of neurology*, 50(6), 718–29.
- Pascual-Leone, A. & Walsh, V. (2001). Fast backprojections from the motion to the primary visual area necessary for visual awareness. *Science*, 292 (5516): 510-512.
- Pascual-Leone, A., Valls-Solé, J., Wassermann, E. M., & Hallett, M. (1994). Responses to rapid-rate transcranial magnetic stimulation of the human motor cortex. *Brain: a journal of neurology*, 117 (Pt 4, 847–58.
- Passamonti, C., Bertini, C., & Ládavas, E. (2009). Audio-visual stimulation improves oculomotor patterns in patients with hemianopia. *Neuropsychologia*, 47(2), 546–55.
- Pearce, J. M. S. (2005). Hemianopia. *European neurology*, 53(2), 111.
- Peelen, M. V., Fei-Fei, L., & Kastner, S. (2009). Neural mechanisms of rapid natural scene categorization in human visual cortex. *Nature*, 460(7251), 94–7.
- Pegna, A.J., Khatib, A., Lazeyras, F. & Seghier, M.L. (2005). Discriminating emotional faces without primary visual cortices involves the right amygdala. *Nature Neuroscience*, 8(1): 24-25.
- Perenin, M. T., & Rossetti, Y. (1996). Grasping without form discrimination in a hemianopic field. *Neuroreport*, 7(3), 793–7.
- Perenin, M.T. (1992). Syndrome occipital. *Encycl. Méd. Chir., Editions techniques, Paris, Neurologie*, 17-036-F-10, 8.
- Perenin, M.T., Jeannerod, M. (1975). Residual vision in cortically blind hemifields. *Neuropsychologia*, 13: 1-7.
- Perlin, R. R., & Dziadul, J. (1991). Fresnel prisms for field enhancement of patients with constricted or hemianopic visual fields. *Journal of the American Optometric Association*, 62(1), 58–64.
- Peyrin C, Baciú M, Segebarth C, Marendaz C. (2004) Cerebral regions and hemispheric specialization for processing spatial frequencies during natural scene recognition. An event-related fMRI study. *NeuroImage*;23:698-707.
- Peyrin C, Chokron S, Guyader N, Gout O, Moret J, Marendaz C. Neural correlates of spatial frequency processing: A neuropsychological approach. (2006a) *Brain Res*;1073-1074:1-10.

- Peyrin C, Mermillod M, Chokron S, Marendaz C. Effect of temporal constraints on hemispheric asymmetries during spatial frequency processing.(2006b) *Brain and Cognition*;62:214-220.
- Peyrin C, Michel CM, Schwartz S, Thut G, Seghier M, Landis T, Marendaz C, Vuilleumier P. (2010) The neural substrates and timing of top-down processes during *coarse-to-fine* categorization of visual scenes: a combined fMRI and ERP study. *J Cogn Neurosci* ;22:2768-2780.
- Peyrin, C. (2003). Reconnaissance des scènes naturelles: approche neurocognitive de la spécialisation hémisphérique du traitement des fréquences spatiales. Thèse de doctorat, Université Pierre Mendès France, Grenoble 2.
- Peyrin, C., Chauvin, A., Chokron, S. & Marendaz, C. (2003). Hemispheric specialisation for spatial frequency processing in the analysis of natural scenes. *Brain Cognition*, 53 (2): 278-282.
- Peyrin, C., Schwartz, S., Seghier, M., Michel, C., Landis, T. & Vuilleumier, P. (2005). Hemispheric specialization of human inferior temporal cortex during coarse-to-fine and fine-to-coarse analysis of natural visual scenes. *Neuroimage*, 28: 464-473.
- Pleger B., Foerster A-F., Widdig W., Henschel M., Nicolas V., Jansen A., Frank A., Knecht S., Schwenkreis P. & Tegenthoff M. (2003) "Functional magnetic resonance imaging mirrors recovery of visual perception after repetitive tachistoscopic stimulation in patients with partial cortical blindness"*Neurosci Lett* ; 335 : 192–196.
- Plow EB, Obretenova SN, Fregni F, Pascual-Leone A, Merabet LB. (2012). Comparison of visual field training for hemianopia with active versus sham transcranial direct cortical stimulation. *Neurorehabil Neural Repair*. 26(6):616-26.
- Poggel DA, Müller-Oehring EM, Gothe J, Kenkel S, Kasten E, Sabel BA (2007) Visual hallucinations during spontaneous and training-induced visual field recovery. *Neuropsychologia*. Jun 18;45(11):2598-607.
- Polat, U., Ma-Naim, T., Belkin, M., & Sagi, D. (2004). Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(17), 6692–7.
- Polyak SL (1941) The Retina. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Poppel, E., Held, R., & Frost, D. (1973). Leter: Residual visual function after brain wounds involving the central visual pathways in man. *Nature*, 243(5405), 295–6.
- Poremba, A., Saunders, R. C., Crane, A. M., Cook, M., Sokoloff, L., & Mishkin, M. (2003). Functional mapping of the primate auditory system. *Science (New York, N.Y.)*, 299(5606), 568–72.
- Poppelreuter W. Disturbances of lower and higher visual capacities caused by occipital damage. Transl. Zihl J, Weiskrantz L. Oxford: Oxford University Press (Clarendon); 1971/1990.
- Posner M.I., Rothbart M.K. (1992). Les mécanismes de l'attention et l'expérience consciente. *Revue de neuropsychologie*, 2, 85-115.

- Posner MI, Petersen SE. (1990). The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci.*13:25-42.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1), 3–25.
- Prusky, G. T., & Douglas, R. M. (2003). Developmental plasticity of mouse visual acuity. *The European journal of neuroscience*, 17(1), 167–73.
- Ptito, M., Herbin, M., Boire, D. & Ptito, A. (1996) Neural basis of residual vision in hemicorticectomized monkeys. *Prog. Brain Res.*, 112: 385-404.
- Raninen, A., Vanni, S., Hyvärinen, L., & Näsänen, R. (2007). Temporal sensitivity in a hemianopic visual field can be improved by long-term training using flicker stimulation. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 78(1), 66–73.
- Rauschecker, J. P., & Korte, M. (1993). Auditory compensation for early blindness in cat cerebral cortex. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 13(10), 4538–48.
- Raz, N., Vaknin, A., Chokron, S., Ben-Hur, T., & Levin, N. (2010). Functional MRI as a tool for assessing chiasmal visual defect in a patient with neuromyelitis optica. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 81(10), 1174–5.
- Raz N, Dotan S, Benoliel T, Chokron S, Ben-Hur T, Levin N. (2011). Sustained motion perception deficit following optic neuritis: Behavioral and cortical evidence. *Neurology*. 76(24):2103-11.
- Rebaï, M., Bernard, C., Lannou, J., & Jouen, F. (1998). Spatial frequency and right hemisphere: an electrophysiological investigation. *Brain and cognition*, 36(1), 21–9.
- Riddoch, G. (1917). On the Relative Perceptions of Movement and a Stationary Object in Certain Visual Disturbances due to Occipital Injuries. *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 10(Neurol Sect), 13–34.
- Risse, J.F. & Delplace, M.P. (1998) Champ visuel neurologique : méthode d'examen – sémiologie. *Encycl. Med. Chir.*, Elsevier, Ophtalmologie, 21-4806-E-50, p.14
- Rizzo M, Robin DA. (1996) Bilateral effects of unilateral visual cortex lesions in human. *Brain.*;119 (Pt 3):951-63.
- Ro, T., & Rafal, R. (2006). Visual restoration in cortical blindness: insights from natural and TMS-induced blindsight. *Neuropsychological rehabilitation*, 16(4), 377–96.
- Roalf, D., Lowery, N. & Turetsky, B.I. (2006). Behavioral and physiological findings of gender differences in global-local visual processing. *Brain and Cognition*, in press.
- Robertson, L.C.& Delis, D.C. (1986). « Part Whole » processing in unilateral brain-damaged patients : dysfunction of hierarchical organization. *Neuropsychologia*, 24(3), 363-370.
- Robertson, L.C., Lamb, M.R. & Knight, R.T. (1988). Effects of lesions of temporal-parietal junction on perceptual and attentional processing in human. *Journal of Neuroscience*, 8: 3757-3769.

- Rocksmith, E. R., & Reding, M. J. (2002). New developments in stroke rehabilitation. *Current atherosclerosis reports*, 4(4), 277–84.
- Rodman, H. R., Gross, C. G., & Albright, T. D. (1989). Afferent basis of visual response properties in area MT of the macaque. I. Effects of striate cortex removal. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 9(6), 2033–50.
- Rombouts S.A., Lazeron R.H., Scheltens P., Uitdehaag B.M., Sprenger M., Valk J. & Barkhof, F. (1998). Visual activation patterns in patients with optic neuritis : an fMRI pilot study. *Neurology*, 50, 6, 1896-1899.
- Rosch E (1978) *Principles of categorization*. In: Rosch BE, Lloyd BB, editors. Cognition and categorization. Hillsdale: Erlbaum:28-49.
- Rossell SL, Bullmore ET, Williams SC, David AS (2002) Sex differences in functional brain activation during a lexical visual field task. *Brain Lang*;80:97-105.
- Rossetti Y., Pisella L., (2002). Several « vision for action » systems : a guide to dissociating and integrating dorsal and ventral functions. In: Prinz W, Hommel B, editors. Attention and performance XIX: common mechanisms in perception and action, *Oxford: Oxford University Press*; 62-119.
- Rossini, P. M., & Dal Forno, G. (2004). Neuronal post-stroke plasticity in the adult. *Restorative neurology and neuroscience*, 22(3-5), 193–206.
- Rousselet A. G., Fabre-Thorpe, M., & Thorpe, S.J. (2002). Parallel processing in high-level categorization of natural images. *Nature Neurosciences*, 5, 629-630.
- Roux F. & Ceccaldi M. (2001). Does aging affects the allocation of visual attention in global and local information processing? *Brain and Cognition*, 46, 383-386.
- Rowe, F. (2009). Visual perceptual consequences of stroke. *Strabismus*, 17(1), 24–8.
- Roy, C. S., & Sherrington, C. S. (1890). On the Regulation of the Blood-supply of the Brain. *The Journal of physiology*, 11(1-2), 85–158.17.
- Russ M.O., Cleff U., Lanfermann H., Schalnus R., Enzensberger W. & Kleinschmidt A. (2002). Functional magnetic resonance imaging in acute unilateral optic neuritis. *Journal Neuroimaging*, 12, 4, 339-350.
- Sabel, B. A. (2008). Plasticity and restoration of vision after visual system damage: an update. *Restorative neurology and neuroscience*, 26(4-5), 243–7.
- Sabel, B. A., & Kasten, E. (2000). Restoration of vision by training of residual functions. *Current opinion in ophthalmology*, 11(6), 430–6.
- Sabel, B. A., Kenkel, S., & Kasten, E. (2005). Vision restoration therapy. *The British journal of ophthalmology*, 89(5), 522–4.
- Sadato, N, Pascual-Leone, A., Grafman, J., Deiber, M. P., Ibañez, V., & Hallett, M. (1998). Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain: a journal of neurology*, 121 (Pt 7, 1213–29.

- Sadato, N, Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibañez, V., Deiber, M. P., Dold, G., & Hallett, M. (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*, 380(6574), 526–8.
- Sadato, N. (2005). How the blind “see” Braille: lessons from functional magnetic resonance imaging. *The Neuroscientist: a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 11(6), 577–82.
- Sadato, Norihiro, Okada, T., Honda, M., & Yonekura, Y. (2002). Critical period for cross-modal plasticity in blind humans: a functional MRI study. *NeuroImage*, 16(2), 389–400.
- Safran, A. B., & Landis, T. (1999). From cortical plasticity to unawareness of visual field defects. *Journal of neuro-ophthalmology: the official journal of the North American Neuro-Ophthalmology Society*, 19(2), 84–8.
- Sahraie, A. (2007). Induced visual sensitivity changes in chronic hemianopia. *Current opinion in neurology*, 20(6), 661–6.
- Sahraie, A., Treveltham, C. T., MacLeod, M. J., Murray, A. D., Olson, J. A., & Weiskrantz, L. (2006). Increased sensitivity after repeated stimulation of residual spatial channels in blindsight. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(40), 14971–6.
- Sahraie, A., Weiskrantz, L., Barbur, J. L., Simmons, A., Williams, S. C., & Brammer, M. J. (1997). Pattern of neuronal activity associated with conscious and unconscious processing of visual signals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(17), 9406–11.
- Sale, A., Berardi, N., Spolidoro, M., Baroncelli, L., & Maffei, L. (2010). GABAergic inhibition in visual cortical plasticity. *Frontiers in cellular neuroscience*, 4, 10.
- Salin PA, Girard P, Bullier J. (1993) Visuotopic organization of corticocortical connections in the visual system. *Prog Brain Res*. 95:169-78.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review*, 103(3), 403–28.
- Saslow MG (1967) Effects of components of displacement-step stimuli upon latency for saccadic eye movement. *J Opt Soc Am* 57:1024-1029
- Sathian K, Lacey S. Journeying beyond classical somatosensory cortex. (2007). *Can J Exp Psychol*. 61(3):254-64.
- Schacter, D. L. (1992). Implicit knowledge: new perspectives on unconscious processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(23), 11113–7.
- Schallert, Leasure, Kolb, (2000) Experience-associated structural events, subependymal cellular proliferative activity, and functional recovery after injury to the central nervous system. in *Journal of cerebral blood flow and metabolism official journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism*.

- Scheibel, M. E., Lindsay, R. D., Tomiyasu, U., & Scheibel, A. B. (1975). Progressive dendritic changes in aging human cortex. *Experimental neurology*, 47(3), 392–403.
- Schlaug, G., Knorr, U., & Seitz, R. (1994). Inter-subject variability of cerebral activations in acquiring a motor skill: a study with positron emission tomography. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 98(3), 523–34.
- Schmid, M. C., Mrowka, S. W., Turchi, J., Saunders, R. C., Wilke, M., Peters, A. J., Ye, F. Q., et al. (2010). Blindsight depends on the lateral geniculate nucleus. *Nature*, 466(7304), 373–7.
- Schmielau, F., & Wong, E. K. (2007). Recovery of visual fields in brain-lesioned patients by reaction perimetry treatment. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 4, 31.
- Schroeder CE, Foxe J. (2005) Multisensory contributions to low-level, 'unisensory' processing. *Curr Opin Neurobiol*.15(4):454-8.
- Schuett S.(2009) The rehabilitation of hemianopic dyslexia. *Nat Rev Neurol*. (8):427-37.
- Schurger, A., Cowey, A., & Tallon-Baudry, C. (2006). Induced gamma-band oscillations correlate with awareness in hemianopic patient GY. *Neuropsychologia*, 44(10), 1796–803.
- Schyns, P.G., & Oliva, A. (1994) From blobs to boundary edges: Evidence for Time and Spatial scale dependent recognition. *Psychological science*, 5: 195-200.
- Seitz, A. R., & Watanabe, T. (2003). Psychophysics: Is subliminal learning really passive? *Nature*, 422(6927), 36.
- Serences, J. T., & Yantis, S. (2006). Selective visual attention and perceptual coherence. *Trends in cognitive sciences*, 10(1), 38–45.
- Sereno, M. I., Dale, A. M., Reppas, J. B., Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Brady, T. J., Rosen, B. R., et al. (1995). Borders of multiple visual areas in humans revealed by functional magnetic resonance imaging. *Science (New York, N.Y.)*, 268(5212), 889–93.
- Sergent J. (1982) The cerebral balance of power: confrontation or cooperation? *J Exp Psychol Hum Percept Perform*;8:253-272.
- Sergent, C., & Dehaene, S. (2004). Is consciousness a gradual phenomenon? Evidence for an all-or-none bifurcation during the attentional blink. *Psychological science*, 15(11), 720–8.
- Sergent, C., & Dehaene, S. (2004). Neural processes underlying conscious perception: experimental findings and a global neuronal workspace framework. *Journal of physiology, Paris*, 98(4-6), 374–84.
- Shaw, S., Kim, P., & Millett, D. (2012). Status Epilepticus Amauroticus Revisited: Ictal and Peri-ictal Homonymous Hemianopsia. *Archives of neurology*, 1–4.

- Siéroff E, Lavidor M. (2007) Examination of the split fovea theory in a case of pure left hemialexia. *Cognitive Neuropsychology*, 24(3):243-59.
- Siéroff E. (1998). Théories et paradigmes expérimentaux de l'attention. *Revue de Neuropsychologie*, vol. 8, n°1, 3-23.
- Siéroff E., Auclair L. (2002). Attention et dissymétrie hémisphérique. *Revue de Neuropsychologie*, 12, 345-375.
- Silvanto J, Cowey A, Lavie N, Walsh V.(2007) Making the blindsighted see. *Neuropsychologia*.5;45(14):3346-50.
- Silvanto J, Walsh V, Cowey A. (2009) Abnormal functional connectivity between ipsilesional V5/MT+ and contralesional striate cortex (V1) in blindsight. *Exp Brain Res* ;193:645-650.
- Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 174-176.
- Sincich LC, Park KF, Wohlgenuth MJ, Horton JC. (2004) Bypassing V1: a direct geniculate input to area MT. *Nat Neurosci.*;7(10):1123-8.
- Smallman, H. S., MacLeod, D. I., & Doyle, P. (2001). Vision. Realignment of cones after cataract removal. *Nature*, 412(6847), 604–5.
- Smirnakis, S. M., Brewer, A. A., Schmid, M. C., Tolias, A. S., Schüz, A., Augath, M., Inhoffen, W., et al. (2005). Lack of long-term cortical reorganization after macaque retinal lesions. *Nature*, 435(7040), 300–7.
- Smith, J. G., & McDowall, J. (2006). The implicit sequence learning deficit in patients with Parkinson's disease: a matter of impaired sequence integration? *Neuropsychologia*, 44(2), 275–88.
- Snow JC, Mattingley JB. Goal-driven selective attention in patients with right hemisphere lesions: how intact is the ipsilesional field? *Brain*. 2006 Jan;129(Pt 1):168-81.
- Spitzyna, G. A., Wise, R. J. S., McDonald, S. A., Plant, G. T., Kidd, D., Crewes, H., & Leff, A. P. (2007). Optokinetic therapy improves text reading in patients with hemianopic alexia: a controlled trial. *Neurology*, 68(22), 1922–30.
- Spolidoro, M., Sale, A., Berardi, N., & Maffei, L. (2009). Plasticity in the adult brain: lessons from the visual system. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 192(3), 335–41.
- Stoerig, P. & Cowey A., (1991). Increment-threshold spectral sensitivity in blindsight. *Brain*, 114, 1487-1512.
- Stoerig, P., Kleinschmidt, A. & Frahm, J. (1998). No visual responses in denervated V1: high-resolution functional magnetic resonance imaging of a blindsight patient. *NeuroReport*, 9: 21-25.
- Stoerig, P., Zontanou, A., & Cowey, A. (2002). Aware or unaware: assessment of cortical blindness in four men and a monkey. *Cerebral cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 12(6), 565–74.

- Sugase Y, Yamane S, Ueno S, Kawano K (1999) Global and fine information coded by single neurons in the temporal visual cortex. *Nature*;400:869-73.
- Talairach, J., Tournoux, P., 1988. Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain. 3-Dimensional Proportional System: An Approach to Cerebral Imaging. Thieme, New York.1988.
- Tamietto, M., & de Gelder, B. (2010). Neural bases of the non-conscious perception of emotional signals. *Nature reviews. Neuroscience*, 11(10), 697–709.
- Tanaka, K. (1996). Inferotemporal cortex and object vision. *Annual review of neuroscience*, 19, 109–39.
- Tant, M.L.M., Cornelissen, F.W., Kooijman, A.C. & Brouwer, W.H. (2002). Hemianopic visual field defects elicit hemianopic scanning. *Vision Research*, 42: 1339-1348.
- Thiebaut de Schotten, M., Dell'Acqua, F., Forkel, S. J., Simmons, A., Vergani, F., Murphy, D. G. M., & Catani, M. (2011). A lateralized brain network for visuospatial attention. *Nature neuroscience*, 14(10), 1245–6.
- Thorpe SJ, Gegenfurtner KR, Fabre-Thorpe M, Bulthoff HH (2001) Detection of animals in natural images using far peripheral vision. *Eur J Neurosci*;14:869-76.
- Thorpe SJ, Gegenfurtner KR, Fabre-Thorpe M, Bulthoff HH. Detection of animals in natural images using far peripheral vision. *Eur J Neurosci*. 2001;14:869-76.
- Thorpe, S., Fize, D. & Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381: 520-522.
- Toosy A.T., Hickman S.J., Miszkiel K.A., Jones S.J., Plant G.T., Altmann D.R., Barker G.J., Miller D.H. &Thompson A.J. (2005). Adaptative Cortical Plasticity in Higher Visual Areas After Acute Optic Neuritis. *Annals of Neurology*, 57, 5.
- Toosy A.T., Werring D.J., Bullmore E.T., Plant G.T., Barker G.J., Miller D.H. & Thompson A.J. (2002). Functional magnetic resonance imaging of the cortical response to photic stimulation in humans following optic neuritis recovery. *Neuroscience Letters*, 330, 255-259.
- Tootell, R. B., & Hadjikhani, N. (2001). Where is “dorsal V4” in human visual cortex? Retinotopic, topographic and functional evidence. *Cerebral cortex (New York, N.Y.)*: 1991, 11(4), 298–311.
- Tootell, R. B., Mendola, J. D., Hadjikhani, N. K., Liu, A. K., & Dale, A. M. (1998). The representation of the ipsilateral visual field in human cerebral cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(3), 818–24.
- Tootell, R. B., Reppas, J. B., Kwong, K. K., Malach, R., Born, R. T., Brady, T. J., Rosen, B. R., et al. (1995). Functional analysis of human MT and related visual cortical areas using magnetic resonance imaging. *The Journal of neuroscience*: the official journal of the Society for Neuroscience, 15(4), 3215–30.
- Tootell, R.B., Silverman, M.S., De Valois, R.L. (1981) Spatial frequency columns in primary visual cortex. *Science*, 214(4522): 813-815

- Treveltham, C. T., Sahraie, A., & Weiskrantz, L. (2007). Can blindsight be superior to "sighted-sight"? *Cognition*, 103(3), 491–501.
- Tsirlin, I., Dupierriex, E., Chokron, S., Coquillart, S., & Ohlmann, T. (2009). Uses of virtual reality for diagnosis, rehabilitation and study of unilateral spatial neglect: review and analysis. *Cyberpsychology & behavior: the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 12(2), 175–81.
- Ungerleider LG & Mishkin M, *Analysis of Visual Behavior*, D.G. Ingle, M.A. Goodale et R.J.Q. Mansfield (eds.), MIT Press, p. 549, 1982.
- van der Wildt, G. J., & Bergsma, D. P. (1997). Visual field enlargement by neuropsychological training of a hemianopsia patient. *Documenta ophthalmologica. Advances in ophthalmology*, 93(4), 277–92.
- Van Essen, D. C., & DeYoe, E. A. (1995). Concurrent processing in the primate visual cortex. In M. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive Neurosciences* (pp. 383-400). Cambridge: Bradford Book.
- Verfaellie M., Bowers D. & Heilman K.M. (1988). Hemispheric asymmetries in mediating intention, but not selective attention. *Neuropsychologia*, 26, 521-531.
- Verhaeghen P., De Meersman L. (1998). Aging and the negative priming effect : A meta analysis. *Psychology and Aging*, 13, 435-444.
- Vighetto, A. (1998). Exploration de la fonction visuelle in *La vision : aspects perceptifs et cognitifs* de Belin C.,
- Voyer D. (1996) On the magnitude of laterality effects and sex differences in functional lateralities. *Laterality*;1:51-83
- Vuilleumier, P., Armony, J.L., Driver, J. & Dolan, R.J. (2003). Distinct spatial frequency sensitivities for processing faces and emotional expressions. *Nature Neuroscience*, 6(6): 624-631.
- Wandell, B. A., Dumoulin, S. O., & Brewer, A. A. (2007). Visual field maps in human cortex. *Neuron*, 56(2), 366–83.
- Weber H, Aiple F, Fischer B, Latanov A (1992) Dead zone for express saccades. *Exp Brain Res* 89:214–222
- Weiskrantz, L. (1989). Consciousness and commentaries. In: Hameroff S, Kaszniak A, Scott A, editors. Towards a science of consciousness II-the second Tuscon discussion and debates. *Cambridge: MIT press*, 371-377.
- Weiskrantz, L., Harlow, A., & Barbur, J. L. (1991). Factors affecting visual sensitivity in a hemianopic subject. *Brain : a journal of neurology*, 114 (Pt 5, 2269–82.
- Weiskrantz, L., Warrington, E.K., Sanders, M.D. & Marshall, J. (1974). Visual capacity in the hemianopic field following a restricted occipital ablation. *Brain*, 97: 709-728.
- Wessinger, C. M., Fendrich, R., & Gazzaniga, M. S. (1999). Variability of residual vision in hemianopic subjects. *Restorative neurology and neuroscience*, 15(2-3), 243–53.

- Wheeler, M. E., & Buckner, R. L. (2004). Functional-anatomic correlates of remembering and knowing. *NeuroImage*, 21(4), 1337–49.
- Wichmann, F.A., Braun, D.I. & Gegenfurtner K.R. (2006). Phase noise and the classification of natural images. *Vision Research*, 46 : 1520-1529.
- WIESEL, T. N., & HUBEL, D. H. (1963). EFFECTS OF VISUAL DEPRIVATION ON MORPHOLOGY AND PHYSIOLOGY OF CELLS IN THE CATS LATERAL GENICULATE BODY. *Journal of neurophysiology*, 26, 978–93.
- Wilkinson DT, Halligan PW, Marshall JC, Buchel C, Dolan RJ. (2001) Switching between the forest and the trees: brain systems involved in local/global changed-level judgments. *NeuroImage*;13:56-67.
- Wilkinson, D.T., Halligan, P.W., Marshall, J.C., Büchel, C. & Dolan, R.J. (2001). Switching between the forest and the trees: brain systems involved in local/global changed-level judgments. *Neuroimage*, 13: 56-67.
- Wilson, T. D., & Dunn, E. W. (2004). Self-knowledge: its limits, value, and potential for improvement. *Annual review of psychology*, 55, 493–518.
- Yovel G, Levy J, Yovel I.(2001) Hemispheric asymmetries for global and local visual perception: effects of stimulus and task factors. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* ;27(6):1369-85.
- Zeki, S. & Ffytche, D.H. (1998). The Riddoch syndrome: insight into the neurobiology of conscious vision. *Brain*, 121: 25-45.
- Zeki, S. (1991). Cerebral akinetopsia (visual motion blindness). A review. *Brain: a journal of neurology*, 114 (Pt 2, 811–24.
- Zhang, X., Kedar, S. & al. (2006) Homonymous hemianopia: Clinical-anatomic correlations in 904 cases, *Neurology*, 66: 906-910.
- Zhang, X., Kedar, S. , Lynn, M. J., Newman, N. J., & Biousse, V. (2006) Natural history of homonymous hemianopia , *Neurology*, 66: 901-905
- Zihl, J. & Von Cramon, D. (1980). Registration of light stimuli in the cortically blind hemifield and its effect on localization. *Behav. Brain Res.*, 1: 287-298.
- Zihl, J. (1980). “Blindsight” improvement of visually guided eye movements by systematic practice in patients with cerebral blindness. *Neuropsychologia*, 18, 71-77.
- Zihl, J. (1995) Visual scanning behavior in patients with homonymous hemianopia. *Neuropsychologia*, 33: 287-303
- Zihl, J. (2000). *Rehabilitation of visual disorders after brain injury*. Hove, UK: Psychology Press.
- Zihl, J., & von Cramon, D. (1979). Restitution of visual function in patients with cerebral blindness. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 42(4), 312–22.
- Zihl J, Werth R. (1984). Contributions to the study of "blindsight"--II. The role of specific practice for saccadic localization in patients with postgeniculate visual field defects. *Neuropsychologia*.;22(1):13-22.

- Zihl, J., & von Cramon, D. (1985). Visual field recovery from scotoma in patients with postgeniculate damage. A review of 55 cases. *Brain: a journal of neurology*, 108 (Pt 2, 335–65.

Annexes

Consigne Etude 1 et 3

Consigne tâche de détection :

Vous devez fixer la croix au centre de l'écran, sans bouger les yeux durant toute la tâche. Un bip sonore apparaît pour vous avertir qu'une image ou NON, apparaît à l'écran. L'image peut apparaître au centre, à droite ou à gauche, et lorsque que rien n'apparaît, l'écran reste gris au moment du bip. Si vous voyez une image, appuyez sur le bouton du bas; si vous ne voyez rien apparaître si aucune image n'apparaît, appuyez sur le bouton du haut. Mettez votre main droite sur le boîtier avec le majeur sur le bouton du haut et l'index sur le bouton du bas. Essayez de répondre le plus vite possible. L'image apparaîtra très vite, ne vous inquiétez pas, c'est normal. Si vous n'êtes pas sûr de vous, appuyez quand même sur l'un des deux boutons.

N'oubliez pas d'appuyer pour signaler lorsque vous ne détectez rien. Nous allons commencer par une phase d'essai afin de vous familiariser avec l'épreuve et les boutons. Ensuite, la tâche dure environ 15 minutes, avec quelques petites pauses pour vous reposer les yeux, si vous en avez besoin.

Je vous rappelle la consigne une dernière fois : appuyez sur le bouton du haut lorsque vous voyez une image apparaître et sur le bouton du bas lorsque vous ne détectez rien à l'écran.

Consigne tâche de catégorisation :

Vous allez voir apparaître des images sur l'écran : soit au centre, soit à gauche soit à droite. Pour chaque image, vous allez devoir déterminer si c'est une ville ou une forêt. Vous devez donner une réponse à chaque fois, et ce, le plus vite possible. Si vous n'êtes pas sûr de vous, essayez quand même de répondre (essayez de deviner au mieux ce que ça pourrait être). Fixez bien la croix centrale. Un bip sonore vous annoncera qu'une image est apparue. Même si vous n'avez pas eu le temps de voir l'image, essayer de répondre. Appuyez sur le bouton du haut si vous voyez une ville, et sur le bouton du bas si vous pensez que c'est une forêt, sachant que toutes les villes ne sont pas identiques entre elles, tout comme les forêts. Certaines images vont vous sembler floues ou difficilement reconnaissables, c'est tout à fait normal. Essayez de répondre quand même. Avant de commencer l'épreuve en elle-même, vous avez une courte période d'essai qui vous permettra de vous familiariser avec les boutons. Au total, l'épreuve dure environ 15 minutes, sachant que des pauses ont été aménagées si vous en avez besoin.

Consigne Etude 2 et 4

"Vous allez participer à deux tâches. Nous commençons par la première tâche. [Détection ou Catégorisation]"

Tâche de DETECTION

"Dans cette tâche, vous allez réaliser plusieurs essais. A chaque essai, vous devrez d'abord fixer une croix au centre de l'écran. Puis un cadre noir apparaîtra rapidement contenant soit une IMAGE soit RIEN. Votre tâche consistera à appuyer sur l'un de ces boutons [*montrer les boutons du boîtier-réponse*] suivant ce que vous avez vu.

[*Faire la démonstration au participant de ce que sont une Croix de fixation, un essai Sans image, et un essai Avec image.*]

Si vous avez vu une **IMAGE**, appuyer sur le bouton du [*haut/bas*]. Si vous n'avez **RIEN** vu à l'intérieur du cadre, appuyez sur le bouton du [*bas/haut*]. [*L'examineur se fiera à ce qui est indiqué sur l'écran.*]

Pour appuyer sur le bouton du bas (le plus proche de vous), vous utiliserez l'index. Pour appuyer sur le bouton du haut, vous utiliserez le majeur.

Essayer de répondre le plus **EXACTEMENT** possible, et le plus **RAPIDEMENT** possible.

L'image apparaîtra très vite, ne vous inquiétez pas, c'est normal. Si vous n'êtes pas sûr de vous, appuyez quand même sur l'un des deux boutons. N'oubliez pas d'appuyer même quand vous ne voyez pas d'image.

Nous allons commencer par quelques essais de pratique pour vous familiariser avec la tâche et les boutons. Ensuite, vous effectuerez le test qui dure 5 minutes et comprend 2 blocs séparés par une pause.

Je vous rappelle la consigne: Si vous voyez une **IMAGE**, appuyez sur le bouton du [*haut/bas*]. Si vous ne voyez **RIEN** vu à l'intérieur du cadre, appuyez sur le bouton du [*bas/haut*]. [*L'examineur se fiera à ce qui est indiqué sur l'écran.*]"

"Nous passons maintenant à la deuxième tâche. [Détection ou Catégorisation]"

Tâche de CATEGORISATION

"Dans cette tâche, vous allez réaliser plusieurs essais. A chaque essai, vous devrez d'abord fixer une croix au centre de l'écran. Puis un cadre noir apparaîtra rapidement contenant soit une IMAGE soit RIEN. Votre tâche consistera à appuyer sur l'un de ces boutons [*montrer les boutons du boîtier-réponse*] suivant ce que vous avez vu.

[*Faire la démonstration au participant de ce que sont une Croix de fixation, un essai Sans image, un essai avec Ville, et un essai avec Autoroute.*]

Si vous avez vu une **VILLE** ou un cadre vide (c'est-à-dire **RIEN**), appuyer sur le bouton du [*haut/bas*]. Si vous avez vu une **AUTOROUTE**, appuyez sur le bouton du [*bas/haut*], sachant que toutes les villes ne sont pas identiques entre elles, de même que les autoroutes. [*L'examineur se fiera à ce qui est indiqué sur l'écran.*]

Pour appuyer sur le bouton du bas (le plus proche de vous), vous utiliserez l'index. Pour appuyer sur le bouton du haut, vous utiliserez le majeur.

Essayer de répondre le plus **EXACTEMENT** possible, et le plus **RAPIDEMENT** possible.

L'image apparaîtra très vite, ne vous inquiétez pas, c'est normal. Certaines images vont vous sembler floues ou difficilement reconnaissables, c'est également normal. Si vous n'êtes pas sûr de vous, appuyez quand même sur l'un des deux boutons. Essayez de deviner ce que cela pourrait être, fiez-vous à votre intuition.

Nous allons commencer par quelques essais de pratique pour vous familiariser avec la tâche et les boutons. Ensuite, vous effectuerez le test qui dure 5 minutes et comprend 2 blocs séparés par une pause.

Je vous rappelle la consigne: Si vous voyez une **VILLE** ou un cadre vide (c'est-à-dire **RIEN**), appuyez sur le bouton du [*haut/bas*]. Si vous voyez une **AUTOROUTE**, appuyez sur le bouton du [*bas/haut*]. [*L'examineur se fiera à ce qui est indiqué sur l'écran.*]"

La transformée de Fourier et les fréquences spatiales

Le système visuel est comparable à un analyseur de Fourier (Guyader, thèse de doctorat, 2004). Une image bidimensionnelle projetée sur la rétine peut être perçue comme une somme de sinusoïdes de différentes amplitudes, phases et orientations. Elles seront représentées sous la forme d'un spectre de fréquences. Cette décomposition est possible grâce à l'opération linéaire appelée transformée de Fourier. La transformée de Fourier inverse filtre de son côté les images, en ne laissant passer que certaines fréquences spatiales (Oliva & Schyns, 1997). Nous obtenons, de ce fait, des images ne faisant apparaître que les informations situées au-dessous d'une certaine fréquence spatiale, en passe-bas, ou au-dessus d'une autre fréquence spatiale, en passe haut. Il est alors possible de créer, respectivement :

- des images de basses fréquences spatiales (BFS), qui présentent un contenu global, flou, dénué de détails,
- des images de hautes fréquences spatiales (HFS), qui présentent le squelette de l'image, les détails de la scène.

La Figure ci-dessous illustre ces différents types de filtrages.

Oliva & Schyns (1997) ont insisté sur l'importance de l'analyse fréquentielle. Elle est antérieure, au niveau du traitement, à de nombreux processus visuels primaires, tels que l'analyse du mouvement, la saccade, ou encore la perception de la profondeur.

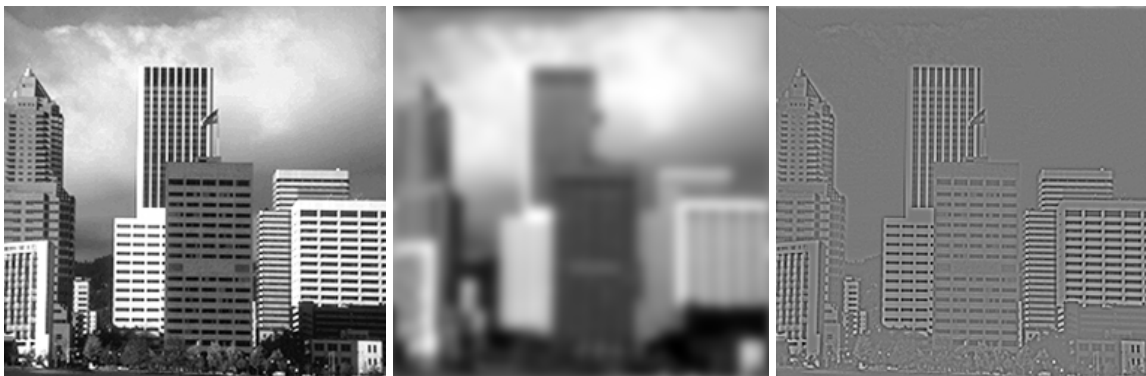


Figure : Exemples d'images non filtrées et filtrées. A gauche, une image de ville non filtrée, au milieu, la même image ne laissant passer que les BFS, et à droite ne laissant passer que les HFS.

I. L’Imagerie cérébrale fonctionnelle

1. Principe de l’imagerie par résonance magnétique (IRM)

L’imagerie par résonance magnétique (IRM) a été inventée au début des années 1970 par Paul Lauterbur. Elle repose sur le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Le principe de cette technique est de mettre en résonance certains noyaux de l’organisme notamment les noyaux d’hydrogène à l’aide d’un champ magnétique puissant. Ce champ magnétique puissant et stable, est produit par un aimant supraconducteur que l’on pourrait comparer de façon simpliste à une énorme bobine parcourue par de l’électricité. Lorsque de l’électricité est produite à l’intérieur d’une bobine un champ magnétique se crée. Voyons comment on peut appliquer cette technique chez l’homme. Le cerveau est composé de plus de 80 % de molécules d’eau (H_2O), et c’est justement le proton d’hydrogène présent dans tout l’organisme qui est mis en résonance en IRM.

Le noyau d’un atome d’hydrogène est formé d’un proton, qui est une particule chargée électriquement possédant alors un moment magnétique, le proton tourne sur lui-même il est dit spin. Lorsque un sujet est soumis au champ magnétique de la machine (B_0) les protons d’hydrogène présents dans les tissus (peau, graisse, muscles, ainsi que dans tout le système nerveux central) s’alignent (selon B_0) majoritairement dans la même direction (ou en sens inverse). On appelle cela une magnétisation des tissus ou Moment magnétique (M_0). Ceci correspond à l’aimantation moyenne de l’ensemble des noyaux d’hydrogène, le cerveau du sujet placé dans la machine est comme aimanté (*cf* figure 1 ci-dessous, Mazoyer B, 2002 ; L’imagerie par résonance magnétique. In : Cerveau et psychologie. Paris : Presses Universitaires de France).

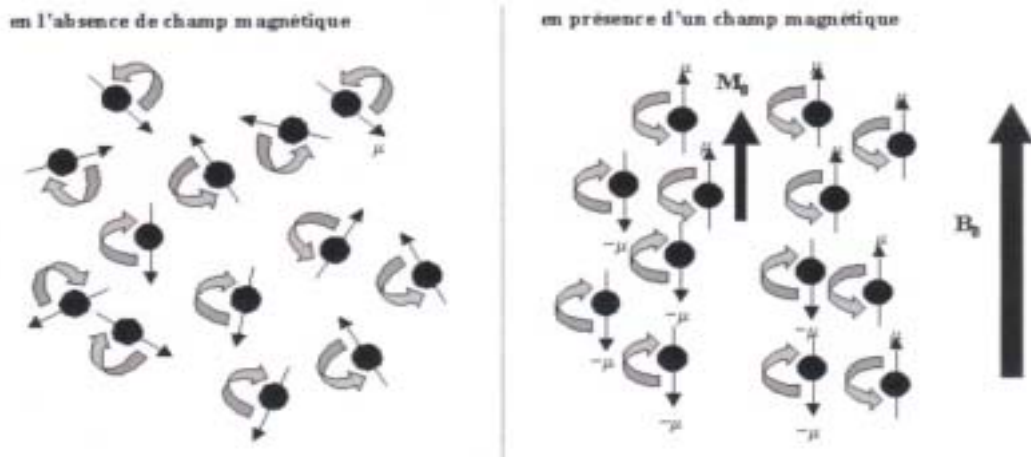


Figure 1 : Principe d'orientation des moments magnétiques (ou spins) des noyaux d'hydrogène dans un champ magnétique. A gauche : en l'absence de champ magnétique, les moments magnétiques (ou spins) des noyaux d'hydrogène de la matière s'orientent de manière aléatoire (correspondant à l'axe de rotation de ses noyaux). A droite : en présence du champ magnétique de la machine (B_0), ces derniers s'alignent suivant l'axe du champ, majoritairement dans la même direction. (Figure tirée de Mazoyer, 2002).

Le but de l'IRM est d'obtenir la mesure de la composante M_0 mais celle-ci est alignée avec B_0 par conséquent sa valeur est trop faible pour être mesurable. Il est alors nécessaire de l'orienter dans une direction différente de celle du champ B_0 . Pour ce faire, un second champ magnétique perpendiculaire au premier (B_0) est appliqué à l'aide d'une antenne placée autour de la tête du sujet. (Figure 2 : représente le champ magnétique B_1 qui est une onde radio du fait de sa fréquence, il est créé par l'antenne de radio-fréquence placée autour de la tête du sujet). La composante M_0 va basculer sous l'effet du champ magnétique B_1 qui tourne à la fréquence de rotation des spins des protons. Apparaît alors dans le plan perpendiculaire à B_0 une composante transverse : c'est le phénomène de résonance magnétique. Des champs magnétiques oscillants dits radiofréquence sont alors appliqués de façon à légèrement modifier cet alignement B_0 et produire un phénomène de précession. Lorsque l'on cesse d'appliquer cette onde radiofréquence les spins reviennent à leur état initial en restituant sous forme d'énergie un signal électromagnétique mesurable. Plus le temps d'exposition à ce champ B_1 est long plus l'angle de bascule de M_0 (à son état initial) est important. On peut alors connaître la valeur de M_0 à partir de cet angle de bascule en fonction de la composante transverse. Le temps de relaxation est le moment où

M_0 se retrouve de nouveau sous l'influence de B_0 , à l'arrêt du champ magnétique B_1 et retrouve sa valeur initiale. Confronté à la matière biologique et notamment cérébrale, ce phénomène n'est pas instantané, il est caractérisé par deux constantes de temps, appelées temps de relaxation. Le premier : longitudinal (T_1) définit la vitesse de retour de la composante M orientée selon B_0 , le second : transversal (T_2 ou T_2^*) définit la vitesse de disparition de la composante transverse de M . Les valeurs de temps de relaxation T_1 et T_2 varient selon le tissu et leur composition, ce qui permet de les différencier.

Le cerveau est formé : de substance grise, de substance blanche et de liquide céphalo rachidien, par conséquent ces « différentes matières » vont engendrer un temps de relaxation différent et permettra ainsi de les visualiser et de les distinguer. Les images cérébrales pondérées en T_1 permettent de visualiser la limite anatomique entre la substance grise, la substance blanche et le liquide céphalo-rachidien (Figure 3) Les images pondérées en T_2 permettent de bien délimiter le liquide céphalo-rachidien, mais ne permettent pas de différencier nettement la substance grise et la substance blanche (Figure 3).

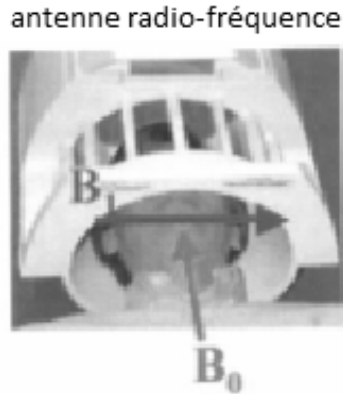


Figure 2 : Antenne radio-fréquence placée sur la tête du sujet servant d'émetteur pour le champ magnétique B_1 , et de récepteur pour enregistrer les variations du champ magnétique. (Figure tirée de Mazoyer, 2002).

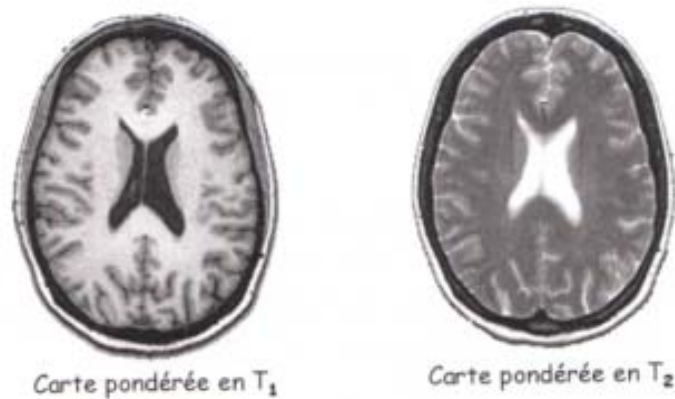


Figure 3 : Coupe axiale d'une même IRM anatomique cérébrale pondérée en T1 (à gauche où le liquide céphalo-rachidien est hypointense) et T2 (à droite où le liquide céphalo-rachidien est hyper-intense). (Figure tirée de Mazoyer, 2002).

2. L'IRM fonctionnelle

L'IRM fonctionnelle (IRMf) telle que nous la connaissons aujourd'hui a été inventée dans les années 1990 par l'équipe de Bruce Rosen à Boston aux Etats-Unis. Mais les premiers travaux qui ont rapporté des variations du débit sanguin cérébral durant des activités mentales sont ceux du physiologiste Italien Angelo Mosso (Mosso, 1881) (Figure 4). Ce dernier a enregistré les pulsations du cortex humain chez des patients souffrant de déformation crânienne à la suite d'une intervention chirurgicale.

Il a montré que les pulsations augmentaient dans certaines régions durant une tâche cognitive et notamment durant une tâche de calcul mental (Figure 5). Il conclut alors – et nous savons aujourd'hui grâce à l'IRMf qu'il conclut de la même manière qu'aujourd'hui – que le débit sanguin cérébral change en fonction de l'activité neuronale. De plus, les observations chez l'animal de Roy et Sherrington (Roy et Sherrington, 1890) ont suggéré un lien entre le débit sanguin et le métabolisme cérébral. Depuis il est admis que les fonctions supérieures du cerveau engendrent des variations locales du débit sanguin, en d'autres termes il existe une relation entre le niveau d'activité électrique des neurones, le débit sanguin et la consommation d'énergie. C'est à partir de ces observations que peu à peu les méthodes d'imagerie fonctionnelle se sont développées.



Figure 4 : Angelo Mosso (30 Mai 1846 - 24 Novembre 1910), Physiologiste Italien du 19^{ème} siècle. Il créa de manière artisanale mais avant-gardiste ; la première technique de neuroimagerie en enregistrant les pulsations du cortex cérébral humain chez un patient traumatisé crânien. Il observa de manière fortuite une relation entre le débit sanguin cérébral et l'activité neuronale (corrélée aux pulsations cérébrales).

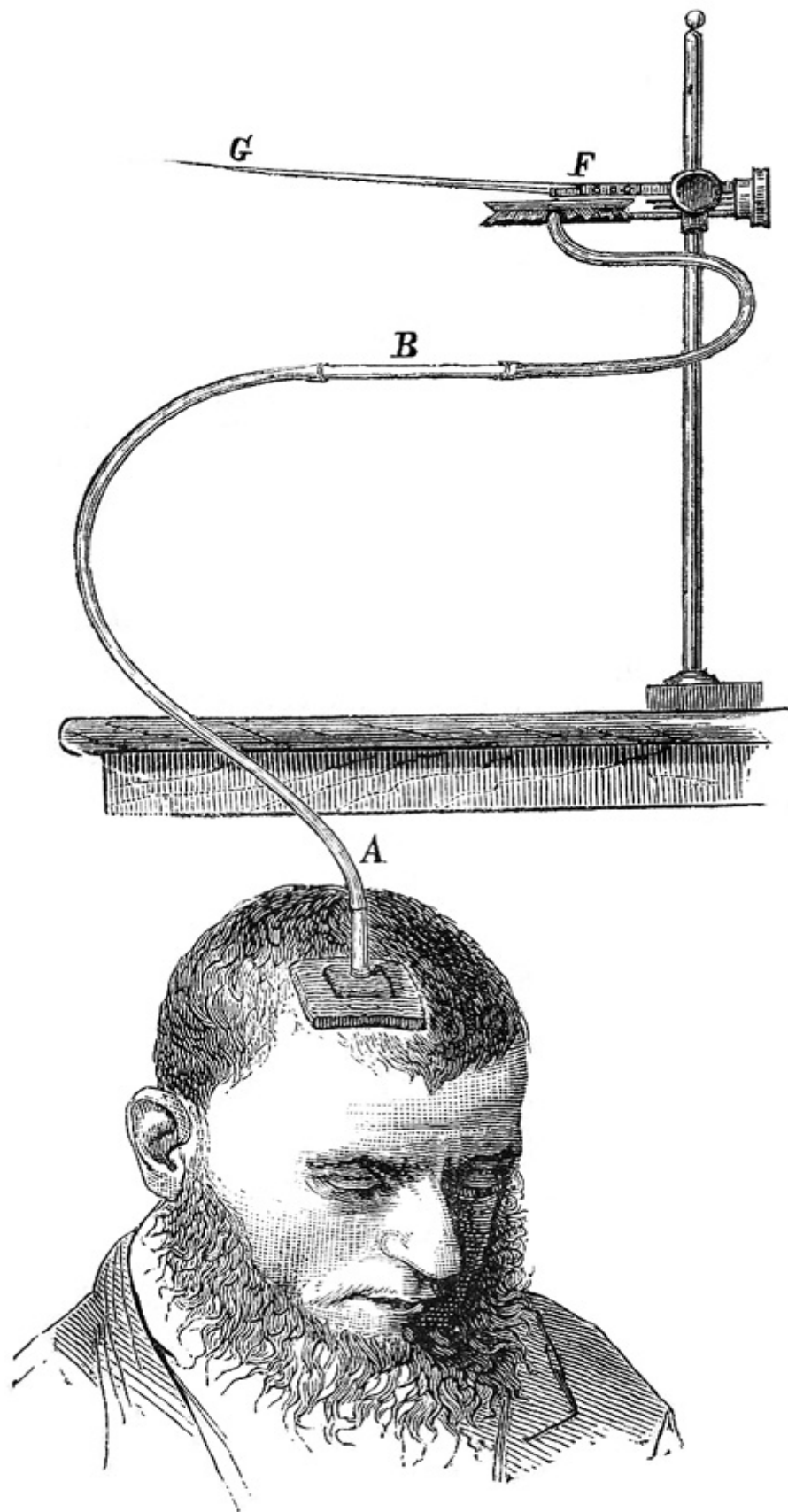


Figure 5 : Gravure représentant l'appareil utilisé par Angelo Mosso pour mesurer les pulsations du cortex cérébral humain, tirée de *La Fatica*, de Angelo Mosso (1881).

L'IRMf permet comme son nom l'indique une étude fonctionnelle du système nerveux central. Cette technique diffère d'une IRM standard, qui permet uniquement une étude morphologique du système nerveux central. Cette technique permet d'obtenir des images fonctionnelles du cerveau humain durant une tâche, avec une résolution de quelques millimètres, en quelques secondes et en continu. Dans notre étude les acquisitions se font en moins de 3 secondes, l'acquisition est ascendante, elle se fait de bas en haut (*cf* partie méthode ci-après). C'est une méthode non invasive, en effet aucune injection de produits de contraste n'est nécessaire. Son champ d'application est très vaste, on étudie l'activité cérébrale en réponse à une tâche effectuée par le sujet. En pratique l'IRMf permet d'étudier l'activité cérébrale des zones du cortex sollicitées par une tâche donnée, dans le but d'étudier une fonction cognitive correspondante, par exemple au langage, aux fonctions exécutives, à la vision, etc.... Dans notre étude nous avons utilisé une tâche visuelle de bas niveau et de haut niveau de traitement (celle-ci sera détaillée dans la partie méthode de ce chapitre).

2.1. Quel phénomène neurophysiologique mesurons-nous durant la réalisation d'une tâche, en IRMf ?

Durant une tâche cognitive les neurones communiquent entre eux à l'aide de neurotransmetteurs, ce mécanisme électrique va provoquer une augmentation de la consommation d'énergie, et engendre une variation de la consommation d'oxygène et de glucose ainsi qu'un changement du débit sanguin cérébral local. Le glucose est la seule source énergétique du cerveau, par conséquent une tâche cognitive nécessitant de l'énergie va engendrer un apport supplémentaire de glucose. Les modifications d'activités électriques neurales liées à l'exécution d'une tâche engendrent un ajustement du débit sanguin cérébral régional.

Donc, lors de l'exécution d'une tâche cognitive le débit sanguin local augmente et enrichit le réseau capillaire en sang artériel riche en oxygène. Ceci de façon abondante, dépassant même la demande métabolique. L'offre en oxygène, plus importante que la demande réelle, va induire une diminution de la concentration en hémoglobine non oxygénée (desoxy-hémoglobine) au niveau des capillaires veineux. Cette diminution de

concentration en desoxy-hémoglobine est l'effet appelé BOLD (Blood Oxygen Level Dependant) (Ogawa et Lee 1990) (Figure 6).

Cette méthode est basée sur l'aimantation de l'hémoglobine contenue dans les globules rouges du sang. L'hémoglobine se trouve sous deux formes : tout d'abord les globules rouges oxygénés par les poumons contenant de l'oxyhémoglobine (molécule non active en IRM) et les globules rouges désoxygénés par le métabolisme des tissus contenant de la désoxyhémoglobine (active en IRM car très paramagnétique). Ceci constitue le signal de base enregistré en IRMf. La molécule d'hémoglobine contient un atome de fer la rendant paramagnétique sous sa forme désoxygénée.

En utilisant des séquences très rapides dites echoplanar (EPI), il est alors possible d'observer l'afflux de sang oxygéné qui « chasse » le sang désoxygéné. Lorsqu'une zone du cerveau augmente son activité, un afflux de sang oxygéné lui parvient grâce notamment à la dilatation des vaisseaux sanguins. Ceci répond ainsi à la demande de consommation locale en dioxygène des cellules actives (c'est le signal BOLD). Plus une structure est active plus le flux sanguin apportant l'oxygène est important. Une saturation en oxygène est alors observée ainsi qu'une légère diminution de la concentration en désoxyhémoglobine, dans la région en activité.

Cette dernière perturbe le champ magnétique entraînant des changements d'intensité du signal RMN. Cette variation du signal va permettre d'identifier les régions en forte activité neuronale, par rapport aux régions moins demandeuses en oxygène donc moins actives. Au repos il y a une faible consommation en oxygène. Lors de la phase d'activation on observe une forte augmentation du débit sanguin, donc du volume sanguin et ainsi de l'apport en oxygène (illustré sur le schéma ci-après).

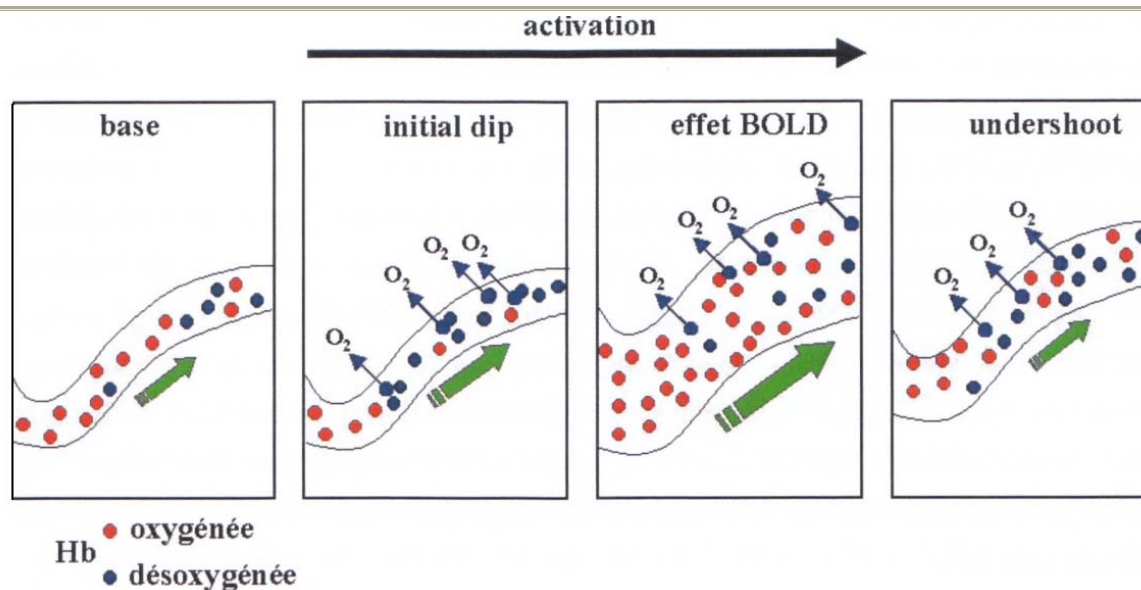


Figure 6 : Signal BOLD qui repose sur le rapport désoxyhémoglobine / oxyhémoglobine (Hb : Hémoglobine). (De gauche à droite : - état de base les vaisseaux sanguins contiennent de l'oxy-hémoglobine et peu de désoxy-hémoglobine. - Lorsque les neurones voisins entrent en activation un apport en oxygène est nécessaire afin de leur fournir l'énergie indispensable pour fonctionner. Cet apport d'oxygène (initial dip) conduit à l'augmentation de la teneur en désoxy-hémoglobine entraînant la dilatation des vaisseaux sanguins et l'augmentation du débit sanguin cérébral régional. - un brusque apport en oxy-hémoglobine et donc une baisse de désoxy-hémoglobine qui caractérise le signal BOLD mesuré en IRMf. - puis le débit sanguin cérébral revient à son état de base : undershoot, qui signe la fin de l'effet BOLD (Figure tirée de Houdé et *al.*, 2002).

3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental mené en IRMf a reçu l'accord du comité Consultatif de Protection des Personnes pour la recherche Biomédicale (CPPRB) Ile-de-France VI, n°DGS2007-0556 [protocole 07042 – ID RCB : 2007-A01088-45 : séance du 7 novembre 2007].

Nous expliquons aux sujets le protocole, un pré questionnaire était alors établi afin de s'assurer de la compatibilité avec la machine 1.5T qui engendre un fort champ magnétique. Nous proposons également aux sujets sélectionnés une visite lors du déroulement du protocole afin qu'ils puissent assister à une passation et prendre conscience de l'engagement. Après avoir lu et signé une notice d'information concernant le protocole ainsi qu'un questionnaire vérifié par un médecin, s'assurant que le sujet ne présente aucun contre indication à l'IRM (telle que la présence de matériaux métalliques : éclats

métalliques dans les yeux...plombages, de pacemaker ou stimulateur cardiaque, de clip ou coil neurochirurgical, de valvule cardiaque, de prothèse auditive ou implant cochléaire, de valve de dérivation ventriculaire, d'appareil dentaire, de stérilet, de filtre dans la veine cave contre les embolies pulmonaires, d'endoprothèse (stent) vasculaire ou coronaire, de traitements médicamenteux susceptibles de biaiser l'enregistrement du signal durant les acquisitions, de maquillage (mascara ou laque pour les cheveux) ou de tatouages ou piercings importants, d'IRM ou d'intervention chirurgicale durant les 6 mois précédents l'examen, de grossesse en cours, chaque sujet donnait de manière écrite son consentement éclairé, au préalable de l'expérience et pouvait changer de décision à tout moment.

3.1. Acquisition des images

L'appareil IRM que nous avons utilisé pour les acquisitions anatomiques et fonctionnelles est un imageur clinique Philips ACS-NT 1,5 Teslas, accessible en service de neuroimagerie de la Fondation Rothschild à Paris.

La première acquisition est une séquence brève de deux dummies scans, elle consiste à établir un repérage trois plans afin de déterminer la position du cerveau du sujet dans l'antenne radio-fréquence.

Celle-ci est suivie de l'acquisition en T2* qui utilise une séquence très sensible et rapide appelée séquence echo-planar, basée sur la commutation très rapide des gradients de champ magnétique, appelée echo-planar imaging (EPI-BOLD).

L'acquisition de l'ensemble du cerveau (de manière continue du bas vers le haut) s'étend sur une durée de 3000 millisecondes correspondant au TR, et permet d'obtenir un volume cérébral, de 33 coupes axiales séquentielles de 3,6cm d'épaisseur chacune. Les images fonctionnelles ont été acquises par bloc en T2* le temps entre deux échos est de 50ms (TE), la matrice d'acquisition et de reconstruction est de 64*64 pixels ; et le FOV *Field-Of-View* de 240*240mm, l'angle de bascule B₁ (flip angle) est fixé à 90°, et la taille des voxels est de 3,75 mm. Durant la série de d'images fonctionnelles, 496 volumes sont acquis. Déroulement d'un essai : un essai se déroule en plusieurs temps : une croix de fixation apparaît 600 ms au milieu de l'écran, elle est suivie par le stimulus visuel pendant 100 ms, enfin le temps de réponse est additionné à l'intervalle inter-stimuli (ISI) et dure

1800 ms. Cela fait un total de 2500 ms pour un essai, soit une durée de 25s par bloc et de 5 minutes pour chaque tâche.

Les séquences de fonctionnelles sont suivies par l'acquisition anatomique T1 qui a pour but d'obtenir des images anatomiques très précises pour lesquelles les contrastes entre les différents tissus est le plus précis possible, de façon à identifier précisément les différentes structures cérébrales. Cette acquisition morphologique en 3D permet de superposer les images fonctionnelles sur cette dernière. Le temps nécessaire de cette acquisition est d'un peu plus de dix minutes. Elle permet de construire une carte tridimensionnelle pondérée en T1 de l'ensemble du cerveau, elle est constituée de 160 coupes axiales jointives de 1 mm d'épaisseur chacune (matrice : 256*256.mm, FOV=240, TE =4.6, angle de bascule : (flip angle) = 20).

Il semble important de préciser que nous utiliserons les termes de volume et de session dans la suite de cet écrit.

1 image = 1 volume = 1 scan

1 run = 1 série = 1 session

3.2. Paradigme

En utilisant un protocole d'IRMf il est alors possible de suivre les modulations de débit sanguin liées à l'activité cérébrale lors de la tâche cognitive proposée.

En post-traitement, à l'aide d'un logiciel SPM (pour *Statistical Parametric Mapping* en anglais) on peut mettre en évidence les zones d'activations du cortex répondant à cette tâche.

En pratique un protocole d'IRMf est basé sur une alternance entre une phase de repos et la tâche effectuée par le sujet (Figure 7). Bien évidemment ce protocole dépend de la fonction cérébrale étudiée.

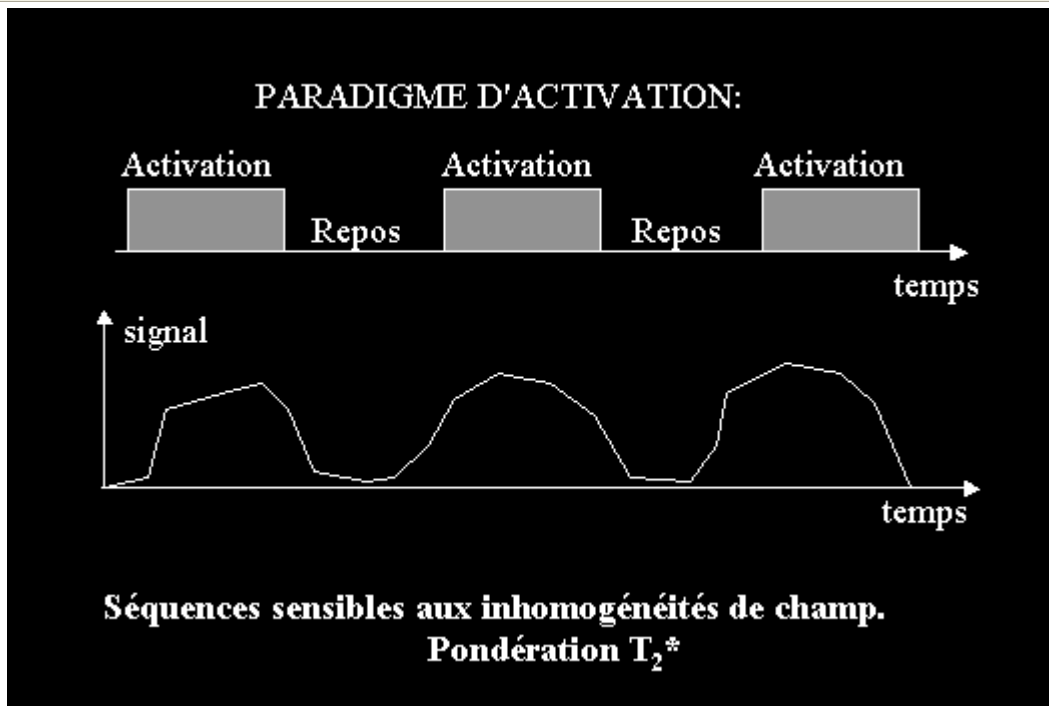


Figure 7 : Exemple d'un paradigme en bloc alternant une phase de repos et la tâche effectuée par le sujet, et en dessous la courbe représente le signal Hrf enregistré. (Figure tirée de C. Neugroschl, Présentation : Imagerie fonctionnelle, principe et applications cliniques).

Dans notre étude, les stimuli, rendus visibles grâce à un jeu de miroirs, étaient projetés, à l'aide d'un vidéo projecteur, sur un écran installé dans la salle d'imagerie. Le bloc de 10 stimuli était répété 6 fois à l'intérieur de chaque tâche, et les deux tâches étaient réalisées successivement à l'intérieur d'une session. Les participants ont réalisé 4 sessions d'imagerie fonctionnelle, soit un total de 24 blocs ou encore de 240 essais par tâche. Des pauses (de 12 secondes) étaient réalisées entre chaque bloc (de 20 secondes) et entre les 2 tâches à l'intérieur de la session (voir : Méthode partie suivante).

3.3. Traitement des images

L'analyse des images a été réalisée selon le modèle linéaire général (Friston et *al.*, 1995) à l'aide du logiciel statistique SPM5 (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK) requérant le logiciel Matlab (The Math Works Inc.TM, version 6.5). Les régions cérébrales activées ont été répertoriées à l'aide de l'atlas de Talairach et Tournoux (1988) chez les participants contrôle, mais chez les patients elles ont été identifiées au niveau individuel avec l'aide du neuro-radiologue en charge de la procédure IRMf (Dr Savatovsky Julien).

3.4. Traitement des données

L'analyse des données vise à répondre à la fois à l'existence et aussi à la localisation des aires cérébrales qui ont modifié leur concentration en désoxy-hémoglobine durant la tâche. Nous présentons de manière rapide les étapes que nous avons suivies pour analyser nos données.

Une fois les données d'IRMf acquises en DICOM récupérées nous les transformons à l'aide d'un logiciel (MRI convert) en format Nifti afin de les rendre compatibles avec le logiciel de traitement des données : SPM5. Le logiciel SPM est un système d'analyse d'images (développé et utilisé sous Matlab) qui peut être utilisé pour des protocoles d'activation cérébrale en IRMf. Il intègre des outils permettant le recalage et la normalisation des images dans l'espace stéréotaxique de Talairach ainsi qu'une batterie de modèles statistiques permettant de réaliser des tests d'hypothèses concernant l'existence d'activation cérébrales. Il peut être utilisé aussi bien pour des analyses de données individuelles (dans notre étude : chez les patients cérébro-lésés) que pour des analyses de groupes (dans notre étude : chez les témoins).

3.4.1. Les prétraitements

Le signal brut issu du scanner IRM nécessite des transformations avant de pouvoir être étudié en vue de détecter les zones d'activations fonctionnelles. Les transformations effectuées dans la pratique ont plusieurs objectifs, énumérés ci-après.

a. Réalignement

Tout d'abord l'étape de réalignement qui permet de corriger les mouvements de la tête du sujet qui ont lieu pendant l'acquisition, en réalignant les différents volumes cérébraux entre eux. En effet bien que la tête du sujet soit maintenue, il y a toujours des dérives minimales qui décalent les volumes fonctionnels entre eux. Il faut donc apporter une correction afin de permettre un recalage des voxels qui sont déplacés. Le réalignement calcule 6 paramètres de déplacements pour chaque voxel par rapport à un volume de référence (3 paramètres de translation et 3 paramètres de rotation) (Figures 8 et 9).

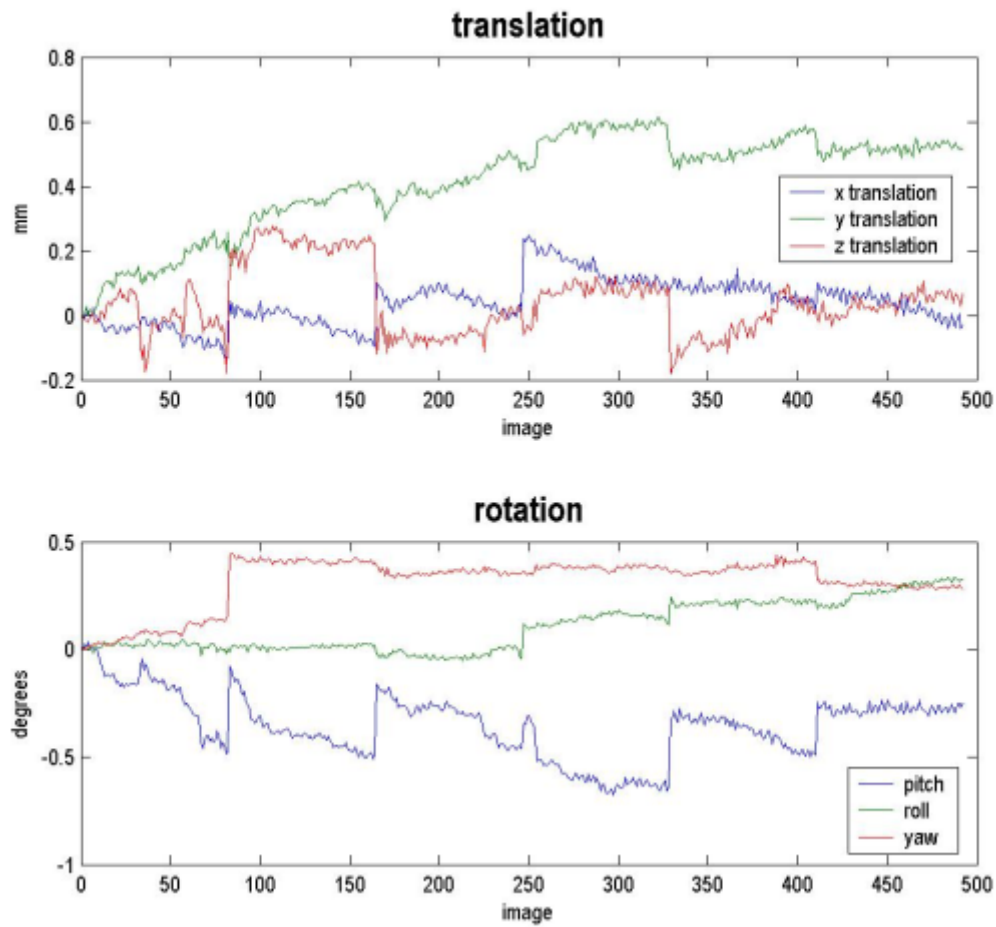


Figure 8 : Illustration des 3 paramètres de translation (x,y,z) leur déviation est mesurée en millimètres, et les 3 paramètres de rotation (pitch, roll, yaw) dont la déviation est mesurée en degrés.

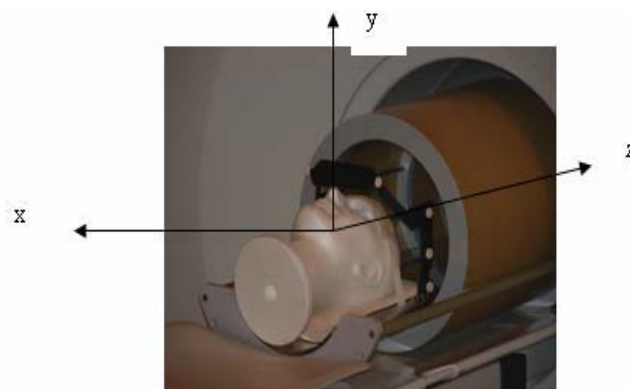


Figure 9 : Représentation du repère spatial « x » : gauche/droite, « y » : arrière/avant et « z » : bas/haut.

b. Slice Timing

Puis le recalage temporel (slice timing) sur les images. Cette étape permet de corriger le décalage temporel d'acquisition entre les différentes coupes pour un volume, elle est nécessaire du fait que l'acquisition d'un volume cérébral n'est pas instantanée. En effet, entre la première coupe prise au temps $t = 0$ seconde et l'acquisition de la dernière coupe, il s'est écoulé un temps appelé TA (temps d'acquisition) et qui est égale à $[TR - (TR/\text{nombre de coupes})]$ c'est-à-dire : $[3 - 3/(33)] = 2.91$, dans le cas de notre étude. Ce décalage temporel doit être corrigé, afin que chaque volume soit considéré comme étant acquis au même instant. Cette correction est effectuée grâce à une interpolation temporelle par rapport à une coupe de référence (la coupe du milieu dans notre analyse).

c. Normalisation

Ensuite l'étape de normalisation (que nous avons appliquée dans notre cas aux sujets témoins et non aux patients hémianopsiques du fait de leur lésion cérébrale) qui permet de projeter les images dans le repère de Talairach. Le but de la normalisation est de repositionner les volumes anatomiques et fonctionnels selon le même volume de référence. En effet, les cerveaux des sujets étant très différents les uns des autres, il est impossible d'effectuer des comparaisons entre sujets sans normalisation. On utilise les volumes de références proposés dans SPM appelés : template sur lesquels on va s'appuyer. Ces templates sont tous dans le même espace de référence : espace MNI, ce qui permet de faire des correspondances anatomiques des activations.

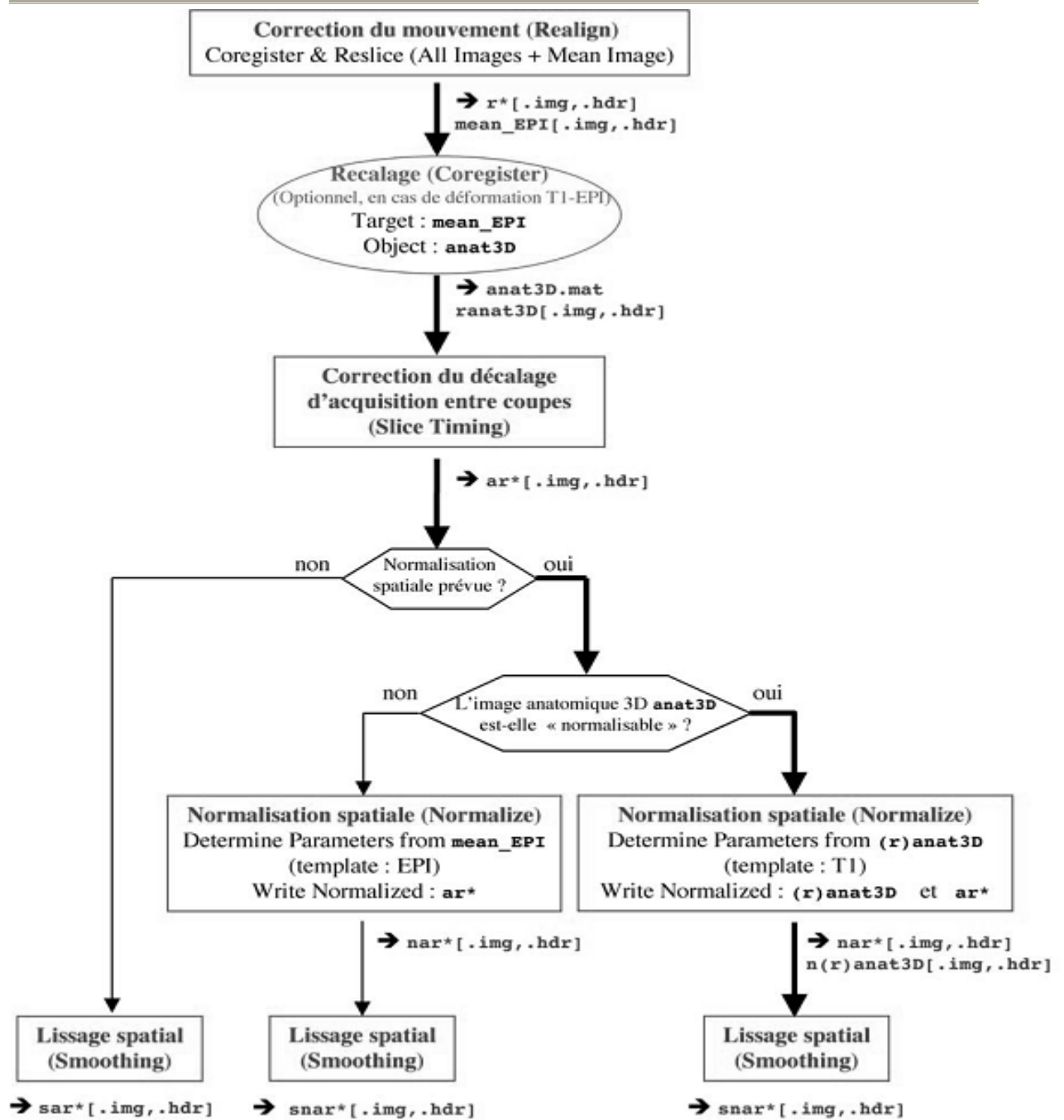


Figure 10 : Schématisation de la chaîne de prétraitement dans le cas où les coupes d'un volume fonctionnel sont acquises en mode séquentiel.

Le calcul se fait par l'intermédiaire d'une latrice de transformation entre les volumes et le template qui caractérise six paramètres de déplacement (comme pour le réalignement) et six paramètres de déformations (zoom et cisaillement).

d. Smoothing

Enfin l'étape du lissage spatial (smoothing) permet d'améliorer le rapport signal / bruit. Il est important de préciser que certaines des étapes énumérées précédemment induisent des transformations qui peuvent avoir des effets non négligeables sur la détection des activations fonctionnelles et même trouver des contrastes pour lesquels il n'y a pas du tout d'activation, ceci est vrai particulièrement pour l'étape de correction des effets de mouvements. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/HBF2/Contents.html>.

Dans le cas de notre expérience IRMf, l'acquisition est séquentielle, c'est-à-dire que les coupes sont acquises dans l'ordre, notamment en ordre ascendant du bas vers le haut. Il existe une autre méthode d'acquisition : la méthode entrelacée: durant laquelle on acquiert d'abord les coupes paires puis ensuite les coupes impaires que nous ne présenterons pas. L'ordre des prétraitements sont présentés Figure 10.

3.4.2. Analyses

Nous nous sommes servis du logiciel SPM pour l'analyse statistique des images, qui se base sur un modèle linéaire général. L'étape d'analyse statistique va nous permettre de répondre aux questions cognitives que nous nous posons, et qui ont orientées la conception du protocole expérimental. Nous avons effectué des analyses individuelles (pour chaque sujet séparément concernant les patients) ou des analyses de groupe (concernant les témoins). Une analyse statistique comprend typiquement quatre étapes, qui sont les suivantes :

- a. La spécification du modèle qui permet de décrire au mieux le paradigme ;
- b. L'estimation des paramètres du modèle sur les données que l'on traite ;
- c. La définition et l'estimation de contrastes : qui nous permettent de faire ensuite les contrastes entre les conditions expérimentales souhaitées en fonction de nos hypothèses, et de déterminer les régions les plus activées détectées par le modèle.

Lors d'une acquisition IRMf, on mesure dans chaque voxel du cerveau, au cours du temps, la réponse hémodynamique induite par l'activation neuronale cérébrale, qui elle-même reflète l'exécution par le sujet des différentes conditions du protocole expérimental. Les analyses statistiques sont appliquées à chaque voxel indépendamment, c'est ce que l'on appelle l'analyse univariée.

Le design de l'analyse statistique met en évidence chaque condition expérimentale par bloc (les conditions qui seront ensuite utilisées pour les contrastes des analyses). Nous avons construit 6 régresseurs pour chaque condition (4 sessions).

d. Normalisation anatomique

Les images anatomiques 3DT1 des sujets sains ont été normalisées, afin de pouvoir localiser les activations obtenues chez les sujets sains en fonction des aires de Brodmann. Pour cela nous nous sommes servis du système proportionnel, développé par Jean Talairach à l'hôpital Sainte-Anne à Paris pour la neurochirurgie stéréotaxique. Les images de chaque individu sont d'abord réorientées et translattées dans un référentiel commun basé sur deux structures cérébrales : les commissures antérieure (CA) et postérieure (CP) (*cf* figures ci-dessous). Ce référentiel, dit bi-commissural, est formé de trois plans orthogonaux au plan de symétrie du cerveau : un plan horizontal passant par les deux commissures (plan CA-CP) et deux plans verticaux orthogonaux au précédent et passant par chacune des commissures (plans VCA et VCP). Les images réorientées de chaque individu sont ensuite soumises à des homothéties (déformation proportionnelle) dans les trois directions principales de l'espace (antéro-postérieure, gauche-droite, haut-bas), le facteur d'homothétie pour chaque direction étant défini comme le rapport d'une taille standard à celle du cerveau du sujet dans cette direction. Ce système de transformations permet d'obtenir pour tous les sujets des images ayant une taille identique. Il ne corrige cependant ni les variations de position des différentes structures cérébrales d'un individu à l'autre, ni les éventuelles asymétries cérébrales.

Le système de Talairach offre également un référent neuroanatomique commun à tous les sujets et à toutes les techniques d'imagerie cérébrale. Dans ce système, un point P du cerveau est repéré par un triplet de coordonnées (X,Y,Z), dites stéréotaxiques, indiquant la position de P par rapport au plan de symétrie (X), au plan VCA (Y) et au plan CA-CP (Z) (Figure 11). La correspondance entre un triplet (X,Y,Z) et une structure cérébrale (gyrus, noyaux gris centraux, faisceau de fibres blanches, aire de Brodmann) est donnée par l'atlas de Talairach, qui contient un ensemble de sections d'un cerveau recalées dans le système proportionnel bi-commissural et sur lesquelles les structures anatomiques ont été indiquées.

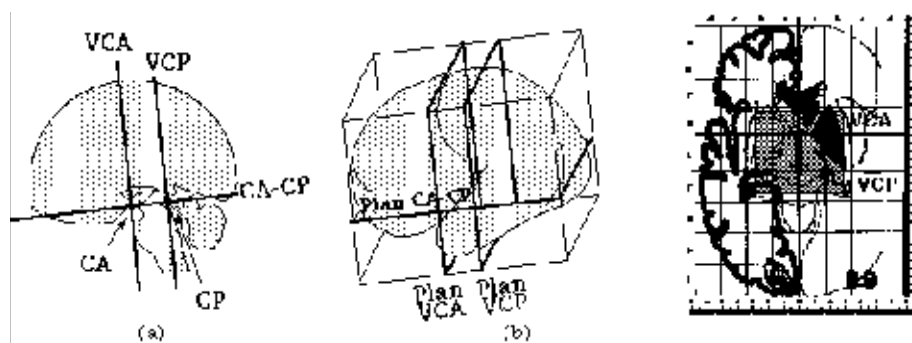


Figure 11 : Illustration du cadre stéréotaxique mis au point et utilisé par Talairach. Image de droite représente une coupe sur l'atlas de Talairach. (Figure tirée de <http://www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=21623>).

RESUME : La répercussion d'un trouble visuel sur le traitement de scènes naturelles a été abordée selon trois approches : 1) une approche comportementale dans le but d'étudier la perception visuelle en champ central et en champs latéralisés, chez les participants sains et chez les patients hémianopsiques à la suite d'une lésion occipitale unilatérale ; 2) une approche fonctionnelle à l'aide d'une étude en IRMf afin d'évaluer tout d'abord l'incidence de la demande cognitive sur une tâche visuelle, chez les participants sains et chez les patients hémianopsiques, en champ central, puis d'observer l'impact d'une lésion occipitale droite et gauche sur la réorganisation corticale ; 3) enfin, une approche neuropsychologique dans le but d'étudier l'effet d'un entraînement visuel dans le champ aveugle des patients HLH, en utilisant les capacités visuelles inconscientes. Nous avons observé un impact différent sur le traitement visuel en champ central selon la latéralisation de la lésion occipitale (droite ou gauche). L'analyse visuelle est plus perturbée à la suite d'une lésion occipitale droite. Les données acquises en IRMf ont permis également de constater une différence des patterns d'activation selon la latéralisation de la lésion occipitale. Enfin, nous avons observé que l'entraînement dans le champ visuel aveugle des patients HLH, en utilisant les capacités de perception implicite : *blindsight*, permet d'obtenir une amélioration du champ visuel de manière quantifiable.

TITLE: Occipital brain damage in visual processing. Behavioral and functional (fMRI) approaches of cortical reorganization.

SUMMARY : Visual processing of natural scenes images was investigated in healthy individuals and patients with homonymous hemianopia (after a unilateral occipital damage) using three methods : 1) behavioral studies where stimuli were presented in the central and lateralized visual fields ; 2) fMRI paradigm to assess the cerebral network underlying natural scenes processing in the central visual field and to assess consequences of right or left occipital lesion on brain reorganization ; 3) a neuropsychological study where the efficiency of visual training in the blind visual field of hemianopsics patients, using blindsight, was investigated. Results showed that occipital lesion side selectively modulates visual performances and pattern of cortical activation. In patients with right occipital damage, performances were severely altered although both hemispheres were recruited. Yet, in patients with left brain damage, performances were less degraded and the right hemisphere was recruited whatever the visual task. Finally, we observed that explicit (conscious) visual detection can be restored (at least partly) in the blind visual field by using implicit (unconscious) visual capacities.

MOTS-CLES : scènes naturelles, fréquences spatiales, hémianopsie latérale homonyme, plasticité cérébrale

DISCIPLINE : Sciences Cognitives, Psychologie et Neurocognition

LABORATOIRES : Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, CNRS, UMR5105, UPMF, Grenoble ; Equipe Vision Recherche et Cognition Fondation Ophtalmologique de Rothschild, Paris.
